

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS E MANUFATURA

Leandro Miyoshi Meyagusku

**Nanofluidos e soluções de nitrito de sódio: um estudo do desempenho como
meios de têmpera**

São Carlos
2015

Leandro Miyoshi Meyagusku

Nanofluidos e soluções de nitrito de sódio: um estudo do desempenho como meios de têmpera

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo,

Orientador: Prof. Dr. Lauralice C. F.
Canale

São Carlos
2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

M612n

Meyagusku, Leandro

Nanofluidos e soluções de nitrito de sódio: um
estudo do desempenho como meios de témpera / Leandro
Meyagusku; orientadora Lauralice de Campos F. Canale.
São Carlos, 2015.

Monografia (Graduação em Engenharia De Materiais e
Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2015.

1. nanofluido. 2. soluções salinas. 3. témpera. 4.
curva de resfriamento. 5. Grossmann. I. Título.

Folha de julgamento

Elaborada pela seção de graduação ou pós-graduação da Instituição de Ensino

RESUMO

MEYAGUSKU, L.M. Nanofluidos e soluções de nitrito de sódio: um estudo do desempenho como meios de têmpera. Número de folhas do trabalho 49f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Departamento de Engenharia de Materiais e Manufatura, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

As soluções de nitrito de sódio são utilizadas como meios de resfriamento na têmpera, normalmente para aços de baixa temperabilidade, já que são classificados como de alta severidade. Estudos na literatura mostram que os nanofluidos são meios de resfriamento que apresentam também alta severidade.

O que se propõe neste estudo é comparar os nanofluidos e as soluções de nitrito de sódio quanto ao desempenho na têmpera. Foram utilizadas diferentes concentrações de sílica para os nanofluidos (0,01%; 0,02%; 0,05%) e para o nitrito de sódio (5%; 7%; 9%). Curvas de resfriamento e cálculo do valor de Grossmann foram usadas como métodos de análise. As comparações do desempenho metalúrgico foram feitas baseadas nas têmperas de amostras dos aços AISI 4140 e AISI 1045, com medidas de dureza e observação microestrutural.

Palavras-chave: nanofluido, soluções salinas, têmpera, curva de resfriamento, Grossmann

ABSTRACT

MEYAGUSLU, L.M. Nanofluids and sodium nitrite solutions: a study of performance as quenchant solutions. Number of paper sheets: 49. Monograph (Coursework final) - Department of Materials Engineering, School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2015.

Sodium nitrite solutions are considered high severity as quenchants and are suitable for quenching of low hardenability steels. Nanofluids are also classified as high severity quenchants.

The aim of this work is to compare cooling and metallurgical performance of those quenchants. The nanofluids were prepared using nanoparticles of silica in different concentrations: 0,01%, 0,02% and 0,05%. Sodium nitrite solutions were prepared in the following concentrations 5%, 7% and 9%. Cooling curves and Grossmann values were obtained for comparation. Steel samples of AISI 4140 and AISI 1045 were quenched, metallographic observations were made and compared with hardness values obtained from those samples.

Key-words: Nanofluids. Brine solutions. Quenching. Cooling curves. Grossmann

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Diagrama CCT- AISI 4140	13
FIGURA 2 – Diagrama CCT- AISI 1045	13
FIGURA 3 – Diferentes estágios de resfriamento durante a têmpera	14
FIGURA 4 – Esquematização da destruição da camada de vapor pelas partículas de sais	17
FIGURA 5 – Esquematização do ângulo de contato com as interfaces	18
FIGURA 6 – Mudanças na velocidade de têmpera com relação a temperatura do banho	20
FIGURA 7 – Estado de tensão existente durante a têmpera	23
FIGURA 8 – Equipamentos para obtenção das curvas de resfriamento	27
FIGURA 9 – Amostras dos Aços para têmpera	29
FIGURA 10a – Amostras cobertas com carvão em caixa metálica	29
FIGURA 10b – Caixa metálica	29
FIGURA 11 – Forno	30
FIGURA 12 – Fluido sendo aquecido em chapa elétrica para têmpera	30
FIGURA 13 – Amostras sendo resfriadas no fluido após austenitização	31
FIGURA 14 – Amostra de aço embutida em baquelite	31
FIGURA 15 – Comparação das curvas de resfriamento do nanofluido e a água	32
FIGURA 16 – Comparação das curvas de taxa de resfriamento do nanofluido e a água	33
FIGURA 17 – Comparação das curvas de resfriamento dos sais e a água	33
FIGURA 18 – Comparação das curvas de taxa de resfriamento dos sais e a água	34
FIGURA 19 – Gráfico da taxa máxima de resfriamento dos fluidos	36
FIGURA 20 – Gráfico da média dos valores de H-Grossman	38
FIGURA 21 – Gráfico de relação de porcentagem de martensita por dureza e teor de carbono	39
FIGURA 22 – Microestrutura da região central do aço AISI 1045 temperado em nanofluido de sílica com concentração 0,01% aumentado 1000X	41
FIGURA 23 – Microestrutura da região central do aço AISI 1045 temperado em nanofluido de sílica com concentração 0,02% aumentado 1000X	42

FIGURA 24 – Microestrutura da região central do aço AISI 1045 temperado em nanofluido de sílica com concentração 0,05% aumentado 1000X	42
FIGURA 25 – Microestrutura da região da borda do aço AISI 1045 temperado aumentado 1000X	43
FIGURA 26 – Microestrutura da região central do aço AISI 1045 temperado em nitrito de sódio aumentado 1000X	43
FIGURA 27 – Microestrutura da região central do aço AISI 4140 temperado em solução de nitrito de sódio aumentado 500X	44
FIGURA 28 – Microestrutura da região da borda do aço AISI 4140 aumentado 1000X	44
FIGURA A1 - Tabela com as propriedades termo físicas do INCONEL 600 em diferentes temperaturas	49
FIGURA A2 - Tabela da correlação entre número de Biot generalizado (Bi_v), Critério de campo de temperatura (ψ) e número de Kondratjev (Kn)	49

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- Valores da massa e do volume de Bindizil utilizados para prepara as soluções	26
TABELA 2- Valores da massa de nitrito de sódio utilizado para preparar as soluções	26
TABELA 3- Composição dos aços AISI 1045 e AISI 4140	28
TABELA 4- Valores obtidos dos cálculos a 700°C	37
TABELA 5- Valores obtidos dos cálculos a 300°C e 200°C	37
TABELA 6- Valores obtidos das medições de dureza aço AISI 1045	40
TABELA 7- Valores obtidos das medições de dureza aço AISI 4140	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	11
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	24
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
6	CONCLUSÕES.....	45
	REFERÊNCIAS.....	46
	ANEXOS.....	49

1 INTRODUÇÃO

Os nanofluidos apresentam um grande potencial no uso como meios de resfriamentos em tratamento térmicos como a têmpera, cujo objetivo é o resfriamento rápido e uniforme da peça. As nanopartículas possuem a capacidade de aumentar a capacidade calorífica do fluido, melhorando significativamente sua capacidade de condução térmica e consequentemente, seu poder de extração de calor. Sua utilização poderá substituir processos onde são necessárias altas velocidades de resfriamento. Os nanofluidos podem ser considerados como a próxima geração de fluidos utilizados como meio de têmpera.

Os nanofluidos ainda não foram completamente entendidos e estudados pela ciência, por isso ainda não se tem certeza absoluta de como ocorre a melhora na capacidade calorífica do fluido pois, apesar de ser uma mistura de um sólido com um líquido, essa solução mostra comportamentos de apenas um único fluido estável e homogêneo.

Como já se sabe, as soluções salinas apresentam um elevado grau de severidade e já são utilizadas há bastante tempo como meios para têmpera, principalmente na têmpera de aços com baixa temperabilidade.

2 OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo fazer uma comparação entre as soluções de nanofluido de sílica e as soluções de nitrito de sódio na utilização como meios de têmpera em dois aços utilizando diferentes concentrações de soluções. Pois como já se sabe as soluções salinas são meios que apresentam elevados níveis de severidade, todavia, as soluções de nanofluido ainda não foram completamente estudadas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Têmpera

A têmpera é um tratamento térmico utilizado principalmente com o objetivo de gerar dureza e resistência em materiais metálicos. Para isso o componente de aço é aquecido até sua temperatura de austenitização, permanecendo por um determinado período de tempo nesta temperatura e posteriormente resfriado rapidamente em algum meio para promover a transformação martensítica. Os meios mais utilizados são: água, soluções de sais e polímeros,

óleos e o ar (PRABHU, K.N.; FERNANDES, P.. 2009). A escolha desse meio irá depender de fatores como temperabilidade do aço, espessura de sua seção transversal, forma geométrica e da microestrutura desejada. O objetivo da têmpera é a obtenção da estrutura de martensita, evitando a formação das estruturas de ferrita e perlita que possuem menor dureza (PRABHU, K. N.; JAGANNATH, V.. 2009).

3.2 Diagramas de transformação - diagramas TTT e CCT

Os diagramas de transformação são conhecidos como diagramas TTT (Tempo-Temperatura-Transformação) ou IT (Isothermal transformation) e CCT (Transformação em resfriamento contínuo). Eles são utilizados para representar a formação das estruturas que não ocorrem em um estado de equilíbrio, ou seja, eles são dependentes do tempo e da temperatura, além da composição do metal. Além de serem afetados pela composição química do metal e também o são pelo tamanho de grão e pela homogeneidade da austenita. Assim, para cada tipo de aço existe uma curva específica, representando as fases de transformação em austenita, perlita, bainita e martensita (CANALE, L. C. F.; TOTTEN, G. E.. 2010) (SILVA, A.L.V.C.; MEI, P.R.. 2006).

Para o tratamento térmico de têmpera os diagramas CCT são mais úteis, uma vez que esse tratamento térmico ocorre por resfriamento contínuo.

A figura 1 mostra uma curva CCT para o aço AISI 4140 e a figura 2 para o aço AISI 1045.

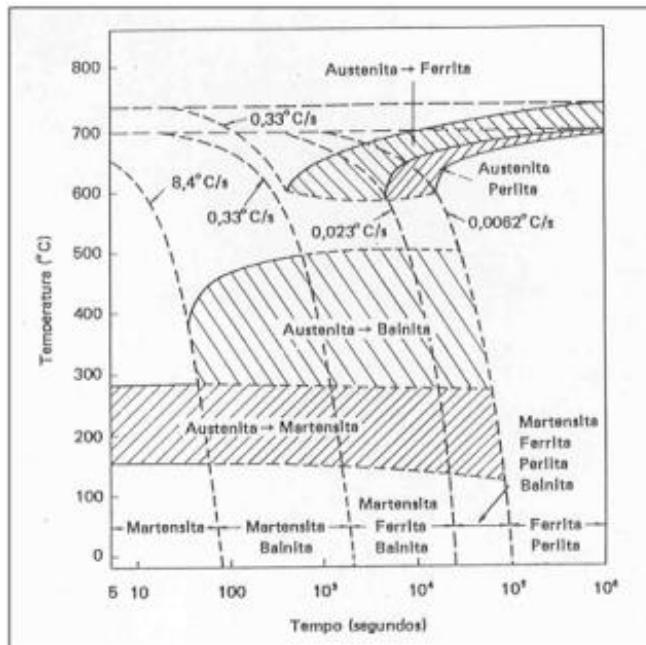


Figura 1 - Diagrama CCT- AISI 4140 (Mestre da Solda. Metalurgia da soldagem - 2015)

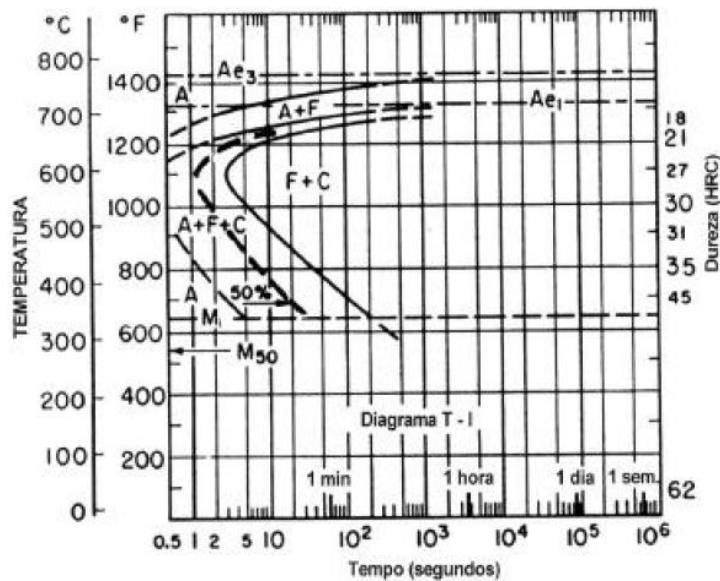


Figura 2 - Diagrama CCT- AISI 1045 (MARTINS, M - 2002)

Observando-se esses diagramas é possível prever quais as velocidades críticas de resfriamento que poderiam gerar as transformações martensíticas. Comparando-se as curvas, verifica-se que os aços de maior temperabilidade (AISI 4140) tem uma velocidade crítica menor, o que praticamente significa que meios de menor capacidade de extração de calor poderiam ser suficientes para o sucesso da têmpera.

3.3 Mecanismos de Resfriamento

O resfriamento do aço na têmpera utilizando um meio líquido vaporizável, acontece em 3 estágios: formação da cortina de vapor, ebulação nucleada e resfriamento por convecção, conforme ilustrado na fig.3.

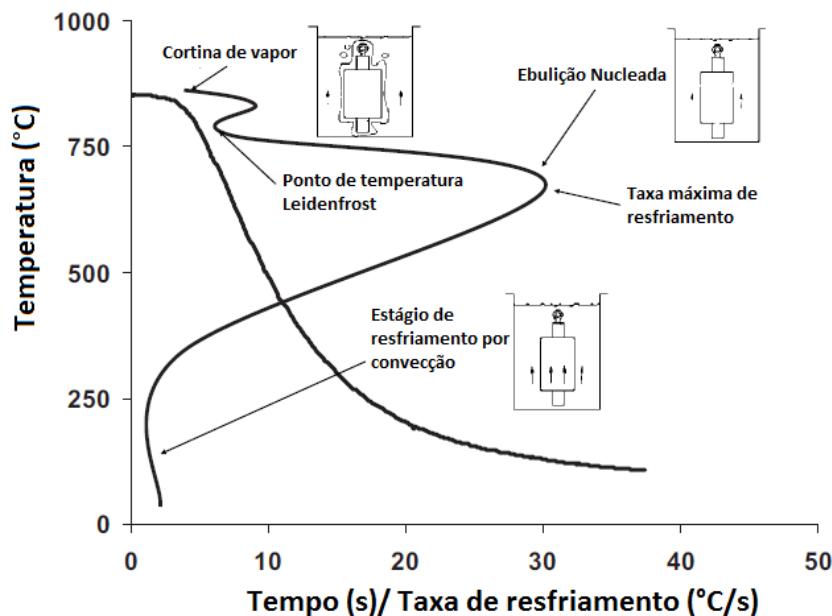


Figura 3 - Diferentes estágios de resfriamento durante a têmpera. (PRABHU, K.N.; FERNANDES, P - 2009)

A primeira etapa é a formação da cortina de vapor, e só ocorre em meios que utilizam líquidos voláteis. Isso acontece devido à alta energia que é fornecida pela peça para o líquido, fazendo com que uma maior quantidade de energia necessária para sua ebulação seja transferida, ocorrendo a formação da cortina de vapor (RAMESH, G.; PRABHU, K.N.. 2011).

A formação da cortina de vapor ocorre porque a peça que esta aquecida se encontra acima da temperatura de Leidenfrost do líquido em questão. Essa camada se forma entre a peça e o líquido, dificultando o molhamento da peça pelo líquido, fazendo com que a troca de calor ocorra por radiação e não por condução térmica. Nessa etapa a taxa de transferência de calor é extremamente baixa, pois a cortina de vapor atua como um isolante térmico, dificultando a transferência (TENSI, H. M.. 2010).

A segunda etapa é a chamada ebulação nucleada. Essa etapa começa quando acontece um rompimento da camada de vapor, quando a temperatura do líquido fica abaixo da temperatura

de Leidenfrost, ocorrendo assim um remolhamento da peça no líquido, fazendo com que ele comece a entrar em ebulação promovendo a formação de bolhas (TENSI, H. M.. 2010). Nessa etapa a taxa de transferência de calor é extremamente alta, pois a peça está em contato direto com o meio líquido, e se dá por condução térmica (CHUNG, J.N.; CHEN, T.; MAROO, S.C.. 2011).

A terceira etapa ocorre quando a peça se encontra abaixo do ponto de ebulação do meio líquido, fazendo com que se cesse a etapa da ebulação, e é chamada de resfriamento por convecção. Nessa etapa a taxa de transferência de calor é baixa, ocorrendo unicamente por convecção. É nessa etapa que ocorre o inicio da transformação martensítica (PRABHU, K.N.; FERNANDES, P.. 2009).

3.4 Nanofluidos

Nanofluidos são soluções coloidais de nanopartículas dispersas em um fluido base. As nanopartículas podem ser metálicas, óxidos metálicos, carbono, vidro ou algum outro material (BARBER, J.; BRUTIN, D; TADIRST, L.. 2011). A grande maioria dessas partículas são materiais metálicos, apresentando uma excelente capacidade de condução térmica, sendo necessária apenas uma pequena quantidade delas para melhorar expressivamente as propriedades do líquido base (BARBER, J.; BRUTIN, D; TADIRST, L.. 2011) (XUAN, Y.; ROETZEL,W.. 2000). Contudo, um dos problemas na utilização das nanopartículas metálicas é que elas podem sofrer oxidação devido ao aumento de temperatura do nanofluido, o que não acontece com as nanopartículas de natureza cerâmica.

Quem utilizou pela primeira vez o termo nanofluido foi Choi (CHOI, S. U. S.; EASTMAN. J.A.. 1995) em 1995, para designar essa nova classe de fluidos que continham partículas metálicas com tamanho médio de 10 nanômetros em suspensão, em fluidos como água, etileno glicol ou óleos.

A condutividade térmica dos nanofluidos é função tanto da nanopartícula quanto do fluido de base, da fração volumétrica, forma e concentração das nano partículas distribuídas no fluido de base. Para estimar a condutividade térmica dos nanofluidos, são usadas aproximações de soluções (sólido + fluido) com tamanho de partículas maiores, na ordem de micrometros ou milímetros. Porém, o uso dessas aproximações não é muito eficiente, pois elas levam em conta apenas a forma das partículas e sua fração volumétrica. Isso ocorre devido ainda não

existir nenhum método capaz de prever a condutividade térmica dos nanofluidos com precisão (XUAN, Y.; ROETZEL, W.. 2000).

Muitas pesquisas já mostraram que, adicionando apenas uma pequena concentração de íons metálicos em uma solução de água, ocorre uma melhora sensível nas suas características como meio de têmpera, pois existe uma melhoria notável em sua capacidade de transferência de calor. (ZUPAN, J.; FILETIN, T.; LANDEK, D.. 2012) realizaram experimentos com a adição de nano partículas de TiO₂ numa base de água e uma solução polimérica, obtendo resultados nos quais as soluções de nanofluidos obtiveram um ganho significativo no poder de transferência calorífica com relação ao fluido base. Pesquisas recentes demonstram o poder de ganho na capacidade calorífica do fluido base com a adição das nano partículas (KIRUBADURAI, B.*et al.*. 2014).

Por outro lado, existem pesquisas recentes que questionam essa melhora que ocorre no poder de transferência de calor do fluido base com a adição das nano partículas e argumentam que elas podem trazer inúmeros efeitos negativos para o fluido base como problemas de erosão e aglomeração (MOHAMAD, A.A.. 2015).

3.5 Soluções aquosas de sais

As soluções salinas são utilizadas como meio de têmpera para aços que necessitam apresentar um elevado grau de dureza após a têmpera, e são normalmente utilizados em aços que apresentam baixa temperabilidade, pois são meios com elevada severidade. Normalmente utiliza-se uma pequena quantidade do sal em meio aquoso. As partículas do sal, quando aquecidas, irão atuar na destruição da camada de vapor que se forma entre a peça e o fluido, fazendo com que a camada de vapor se colapse mais rapidamente, evitando com isso uma transferência de calor não uniforme, e antecipando a etapa de ebulição nucleada, sendo ela a etapa mais importante com relação à transferência de calor entre a peça e o meio líquido, como é ilustrado na figura 4. Com isso, não se precisa de um nível alto de agitação como ocorre com a água pura para obter bons resultados de têmpera. A natureza corrosiva dos sais pode ser um dos problemas em utilizar soluções salinas como meio de têmpera, trazendo problemas para a peça que esta sendo temperada e também para o equipamento utilizado (KORAD, T. *et al.*. 2011).

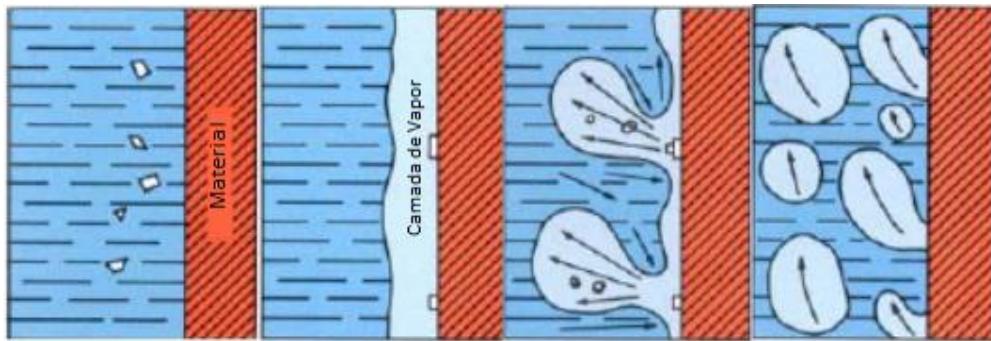


Figura 4 – Esquematização da destruição da camada de vapor pelas partículas de sais

Quando comparado com outros meios, a peça que foi temperada com uma solução salina é a que apresenta a maior porcentagem de martensita em sua estrutura final quando comparada com relação à água pura e o óleo (TIWARY, V. *et al.* 2014).

Nos sais a taxa máxima de resfriamento é obtida com a sua temperatura próxima a 20°C. Além disso, estudos mostraram que a taxa de transferência máxima de calor para uma solução básica de NaOH e uma salina de NaCl são obtidas com uma concentração de apenas 10%. A taxa de resfriamento das soluções salinas são maiores em comparação a água pura no mesmo grau de agitação (TOTTEN, G.E.; BATES, C.E.; CLINTON, N.A.. 1993).

3.6 Parâmetros importantes no resfriamento

3.6.1 Molhabilidade

A molhabilidade é a interação que ocorre entre dois ou mais fluidos e um substrato sólido (WOLF, F.G.. 2006). Ela pode ser definida como o quanto um líquido se espalha em um determinado meio sólido. A molhabilidade é quantificada através de um ângulo, sendo ele nomeado de ângulo de contato, que é o ângulo resultante entre a linha que é paralela à superfície do substrato sólido e uma linha tangente ao líquido que separa o líquido e o vapor, estando as 3 fases em equilíbrio, como ilustrado na figura 5 (WOLF, F.G.. 2006). Para ângulos menores que 90° é definido que o líquido molha a superfície e, quanto menor esse ângulo, maior é a molhabilidade do líquido. Já quando se tem ângulos maiores que 90° é definido que o líquido não molha a superfície, ou seja, é não molhante (PRABHU, K. N.. 2010). Por fim, quando o ângulo é 0°, o líquido forma um filme fino na superfície do substrato (WOLF, F.G.. 2006).

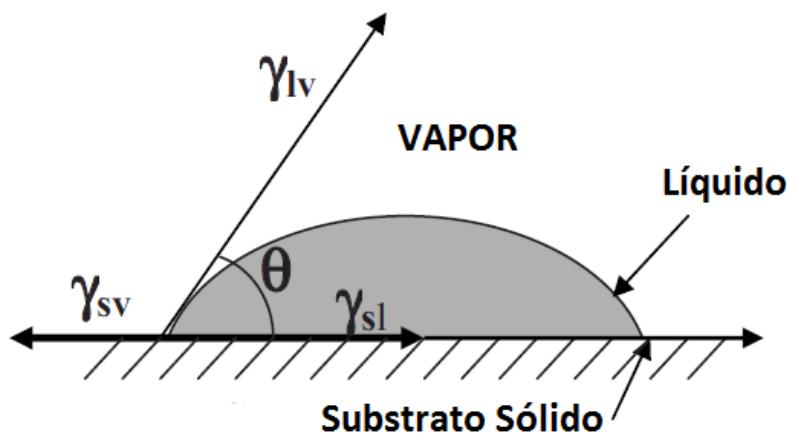


Figura 5 – Esquematização do ângulo de contato com as interfaces (PRABHU, K.N.; FERNANDES, P. - 2009)

Uma equação que relaciona o ângulo de contato com as energias interfaciais em um estado de equilíbrio é a equação de Young-Dupre.

$$\cos \theta = \gamma_{sv} - \gamma_{sl} / \gamma_{lv} \quad (1)$$

Na equação, a letra gama representa a energia superficial e as letras s, l e v são as indicações de sólido, líquido e vapor. Essa equação só é válida para condições ideais e não devem ocorrer reações químicas e nem físicas entre o substrato sólido e o líquido (PRABHU, K. N.. 2010).

O grau de molhabilidade de um determinado líquido é de fundamental importância na têmpera, já que a molhabilidade afeta a taxa de transferência de calor que ocorrerá entre a peça e o líquido, pois a transferência de calor na fase de ebulição nucleada depende unicamente da troca de calor por condução térmica. Esse parâmetro é mais utilizado no caso dos óleos, pois ele está diretamente relacionado com a viscosidade do fluido.

3.6.2 Agitação

Um dos fatores que influenciam diretamente o processo de têmpera é a agitação do fluido utilizado como meio de resfriamento. Ela influencia diretamente no seu poder de extração de calor. A agitação faz com que o primeiro estágio de resfriamento, que é a formação da cortina de vapor, se colapse mais rapidamente, ocorrendo uma transição mais rápida para o estágio de ebulição nucleada, além disso, faz com que a taxa de resfriamento nos três estágios aumente. Os fatores que influenciam a velocidade de agitação são o tipo de fluido utilizado, o modo

como está colocado a peça, a direção do fluxo das correntes e taxa do fluxo (PRABHU, K.N.; FERNANDES, P.. 2009).

A agitação aumenta a taxa de transferência de calor porque grande parte do líquido permanece abaixo da temperatura de vaporização devido ao rápido contato que ocorre entre o líquido e a superfície da peça com uma taxa volumétrica alta de líquido. Além disso, é possível obter um melhor controle da taxa de resfriamento por toda a peça sendo temperada, pois se consegue manter uma temperatura uniforme do banho (TOTTEN, G.E.; BATES, C.E.; CLINTON, N.A.. 1993).

3.6.3 Temperatura do Banho

A temperatura do banho influencia diretamente o poder de extração de calor do fluido, pois altera sua taxa de resfriamento. As soluções aquosas são as mais afetadas em mudanças na temperatura do banho. Isso ocorre por elas apresentarem uma diferença muito pequena entre a faixa de temperatura do banho e a sua faixa de temperatura de ebulação, ao contrário dos óleos. Dentre as soluções aquosas, os sais e os polímeros são menos sensíveis do que a água pura, que com apenas um pequeno aumento de sua temperatura apresenta uma grande queda em sua taxa de resfriamento.

Para efeito de comparação com os nanofluidos, pode ser observado na figura 6 que os óleos apresentam um comportamento diferente com relação às soluções aquosas, eles não apresentam uma diminuição nas suas características de resfriamento com o aumento de temperatura, em alguns tipos ocorre até um aumento em suas taxas de resfriamento até determinadas temperaturas, apenas para temperaturas muito baixas ou muito elevadas que levará a uma alteração nas características dos óleos (PETROFER INDUSTRIAL OILS AND CHEMICALS.. 2015) (TOTTEN, G.E.; BATES, C.E.; CLINTON, N.A.. 1993).

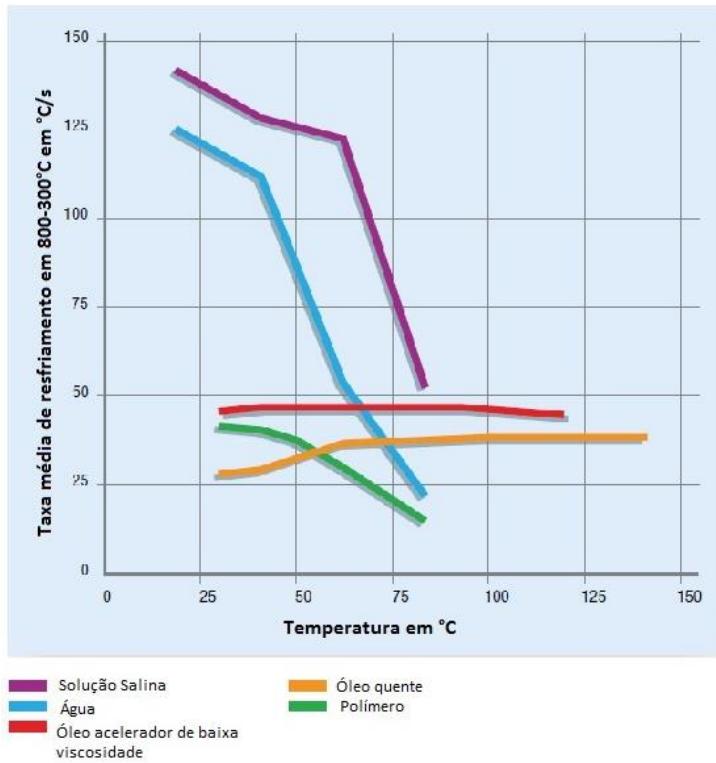


Figura 6 - Mudanças na velocidade de têmpera com relação à temperatura do banho (PETROFER INDUSTRIAL OILS AND CHEMICALS - 2015)

3.7 Tranferência de calor - Severidade

Para se escolher determinado meio de têmpera é necessário analisar o poder de extração calorífica desse meio, que é denominado como sendo sua severidade. Existem diversos métodos para se realizar essa análise, que pode ser feita analisando o endurecimento da peça após a têmpera ou através do cálculo do coeficiente de transferência de calor do meio (PRABHU, K.N.; FERNANDES, P.. 2009).

Um desses métodos é o de Kobasko, que através da análise das curvas de resfriamento do meio é possível calcular o seu coeficiente de transferência de calor. Isso é feito através da relação do numero de Kondratjev (K_n) e o número de Biot generalizado (Bi_v) (PRABHU, K. N.. 2010) (OTERO, R. L. S.. 2012).

Para o cálculo são utilizados dois pontos da curva de resfriamento e seus respectivos tempos t_1 e t_2 para se calcular o parâmetro m que é a intensidade da mudança de temperatura

$$m = \frac{\ln(T_1 - T_q) - \ln(T_2 - T_q)}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

Ou

$$m = \frac{w}{T - T_q} \quad (3)$$

Sendo:

T_q é a temperatura do fluido (K)

T_1 e T_2 são as temperaturas da sonda nos tempos t_1 e t_2

T é a temperatura de análise

w é a taxa de resfriamento em °C/s na temperatura T

Com o valor de m é possível calcular o número de Kondratjev (K_n):

$$K_n = \frac{m}{m_\alpha} \quad (4)$$

$$m_\alpha = \frac{\lambda}{K} \quad (5)$$

No qual para um cilindro o valor de K é:

$$K = \frac{R^2}{5,783} \quad (6)$$

O termo λ é a difusividade térmica do material da sonda, m^2/s , que é mostrado na figura A1 nos anexos.

Com isso, a relação entre o número de Kondratjev (K_n) e o número generalizado de Biot :

$$K_n = \psi \times Bi_v \quad (7)$$

ou

$$K_n = \frac{Bi_v}{(Bi_v^2 + 1,437Bi_v + 1)^{1/2}} \quad (8)$$

O número generalizado de Biot (Bi_v) pode ser encontrado na tabela que o relaciona com o número de Kondratjev (K_n) na figura A2 nos anexos.

Finalmente, o coeficiente de transferência de calor (h_k) é determinado por:

$$h_k = \frac{Bi_v \alpha V}{KA} \quad (9)$$

Sendo:

Bi_v é o número generalizado de Biot

α é a condutividade térmica da sonda

V é o volume da sonda

A é a área superficial da sonda

Outro método é o método de Grossman, no qual se é obtido o valor de H ou severidade de Grossman. Esse método consiste em temperar, em um mesmo meio, diversas barras com diferentes diâmetros (D) de um determinado tipo de metal. Após isso, seccionam-se as barras e é medido o diâmetro do centro que não foi endurecido (D_u). Plota-se então um gráfico relacionando os diâmetros (D/D_u), pelo produto do diâmetro (D) pelo fator H . Com isso, utilizando esses gráficos é possível obter o valor de H para os diversos metais (TOTEN, G.E.; BATES, C.E.; CLINTON, N.A.. 1993).

Outro modo de calcular o valor de H de Grossman é através do coeficiente de transferência de calor do meio, utilizando a seguinte fórmula (PRABHU, K. N.. 2010):

$$H = \frac{h_k}{2K} \quad (10)$$

Em que:

h_k é o coeficiente de transferência de calor do meio

K é a condutividade térmica do metal

3.8 Tensões internas

As tensões internas são resultado da combinação de um gradiente de temperaturas, que é formado entre a superfície da peça e o seu centro, devido à geometria da peça e a sua variação

de temperatura, e da transformação da estrutura de austenita em martensita, que apresenta uma estrutura menos compacta.

O gradiente de temperaturas se forma devido à diferença na taxa de resfriamento que ocorre entre a superfície da peça e o seu interior. A superfície resfria mais rapidamente que a parte interior, fazendo com que a superfície contraia mais rapidamente que a parte interna, comprimindo-a. Quanto maior for a severidade do meio de têmpera, maiores serão os gradientes formados (SILVA, A.L.V.C.; MEI, P.R.. 2006).

Já a parte interna sofre sua transformação martensítica posteriormente à parte da superfície, fazendo com que ela se expanda, comprimindo a parte externa, como ilustrado na figura 7.

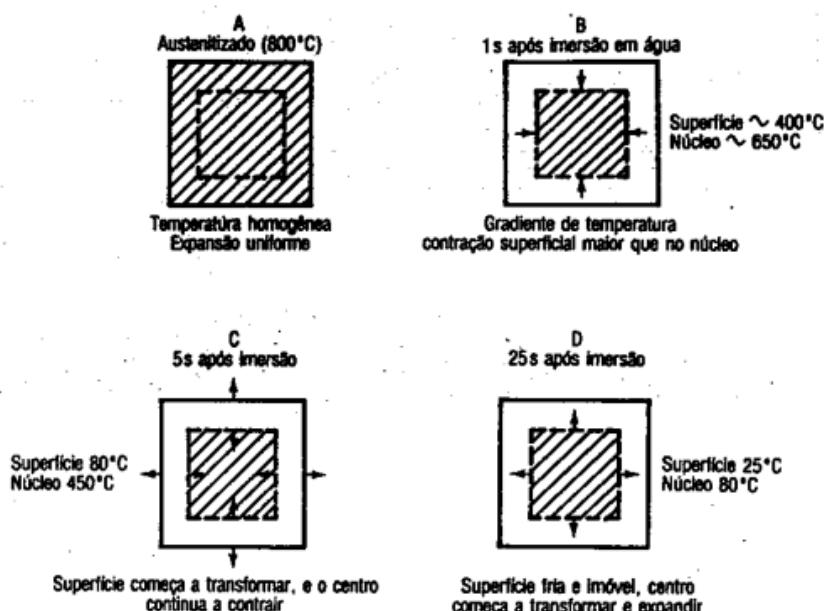


Figura 7 - Estado de tensão existente durante a têmpera (SILVA, A.L.V.C.; MEI, P.R - 2006)

Tal fenômeno faz com que surjam tensões internas na peça. Se essas tensões ultrapassarem o limite de escoamento do material, ocorrerá uma deformação plástica podendo empenar a peça, já se ela ultrapassar o limite de ruptura, a peça pode se romper (SILVA, A.L.V.C.; MEI, P.R.. 2006).

3.9 Temperabilidade

Temperabilidade é a capacidade de um aço em formar martensita a uma determinada profundidade, a partir da austenitização de sua estrutura e posterior resfriamento rápido, ou

seja, após sofrer o tratamento de têmpera. Quanto maior for a profundidade da têmpera na secção transversal, maior é a sua temperabilidade e consequentemente maior é sua capacidade de endurecimento. Os ensaios mais utilizados para medir a temperabilidade dos aços são o Grossmann e o Jominy (SILVA, A.L.V.C.; MEI, P.R.. 2006).

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Materiais

4.1.1 Preparação do nanofluido de sílica

- Sílica coloidal, Bindzil® 50/80 da AkzoNobel
- Água destilada
- Balança digital de precisão (peso máx.3000 g, e = 0,1 g)

4.1.2 Preparação da solução aquosa de nitrito de sódio

- Nitrito de sódio da Synth®
- Água destilada
- Balança digital de precisão (peso máx.3000 g, e = 0,1 g)

4.1.3 Obtenção das curvas de resfriamento

- 2000 mL de nanofluido de sílica a base de água nas seguintes concentrações: 0,01%, 0,02% e 0,05%
- 2000 mL de solução aquosa de nitrito de sódio nas seguintes concentrações: 5%, 7% e 9%
- Água destilada
- Termômetro
- Sonda cilíndrica INCONEL 600, com termopar do tipo K no centro geométrico
- Tripé para fixação de sonda durante a têmpera
- Forno para sonda N1100
- Chapa aquecedora Marchesoni®, 220V, 550W
- Aquisitor de dados LabJack U6-PRO

4.1.4 Têmpera

- Discos com 1” 1/2 de diâmetro e 10 mm de espessura dos aços AISI 1045 e AISI 4140
- Forno

- 5000 mL de nanofluido de sílica a base de água nas concentrações: 0,01%, 0,02% e 0,05%
- 5000 mL de solução aquosa de nitrito de sódio nas seguintes concentrações: 5%, 7% e 9%
- Balde de alumínio
- Carvão

4.1.5 Metalografia

- Microscópio óptico
- Amostras dos aços temperados AISI 1045 e AISI 4140
- Baquelite
- Nital 2%
- Cortadeira elétrica
- Politriz
- Lixas

4.2 Métodos

4.2.1 Obtenção dos fluidos de resfriamento

Neste trabalho foram utilizados como fluidos de resfriamento o nanofluido de sílica – Bindizil® e o nitrito de sódio – Synth®.

Para o cálculo das soluções foi usado a seguinte metodologia.

- Cálculo da quantidade de Bindizil® utilizado na preparação dos nanofluidos de sílica

Primeiramente obteve-se o volume de sílica que seria utilizado multiplicando-se a porcentagem da concentração ($x\%$) pelo volume total da solução (V_T mL):

$$v_{sílica} = (x\% \times V_T) \text{ mL}$$

Com o volume de sílica obtém-se a massa de Bindizil® que apresenta 50% em peso de sílica por isso a massa de Bindizil® utilizada é igual a duas vezes a massa de sílica:

$$\rho_{sílica} = \frac{m_{sílica}}{v_{sílica}} ; m_{sílica} = v_{sílica} \times 2.5 \text{ g/cm}^3 (\rho_{sílica}) = Y \text{ g de sílica } ((2 \times Y) \text{ g de Bindzil})$$

Com os valores da densidade do Bindizil® e sua massa, acha-se seu volume:

$$v_{Bindzil} = \frac{m_{Bindzil}}{\rho_{Bindzil}} \text{ mL}$$

A tabela 1 abaixo indica a massa e o volume de Bindizil® utilizado para preparar 5000 mL das seguintes concentrações.

Tabela 1- Valores da massa e do volume de Bindizil® utilizados para preparar as soluções

Concentração	Massa de Bindizil®	Volume de Bindizil®
	(g)	(mL)
0,01%	2,5	1,79
0,02%	5	3,57
0,05%	12,5	8,93

- Cálculo da massa de nitrito de sódio utilizado na preparação das soluções salinas.

Conforme mostrado na equação abaixo, multiplica-se a concentração ($x\%$) pelo volume total da solução (V_T) e multiplica-se pela densidade da água.

$$m_{NaNO_2} = (x\% \times V_T \text{ mL} \times \frac{1000\text{g}}{1000\text{mL}}) \text{ g}$$

Assim a tabela 2 indica a massa de nitrito de sódio utilizado para preparar 5000 mL das seguintes concentrações.

Tabela 2- Valores da massa de nitrito de sódio utilizado para preparar as soluções

Concentração	Massa de Nitrito de Sódio
	(g)
5%	250
7%	350
9%	450

Com os resultados obtidos, as soluções foram preparadas da seguinte forma: utilizou-se uma balança para obter as quantidades desejadas tanto de nanofluido de sílica quanto de nitrito de sódio. Em seguida, cada uma dessas quantidades foi colocada em bêqueres individuais. Posteriormente, adicionou-se a esses bêqueres água destilada e, com a ajuda de uma baqueta de vidro, mexeu-se a solução. Após isso, elas foram armazenadas em recipientes que foram etiquetados e datados.

4.2.2 Curvas de resfriamento

As curvas de resfriamento foram obtidas para os nanofluidos de sílica, soluções de nitrito de sódio e de água destilada. Primeiramente, 2000 ml do fluido desejado para se obter a curva foi colocado em um bêquer e aquecido até a temperatura de 40°C. A sonda foi aquecida em um forno até a temperatura de 850°C.

Após isso, o bêquer foi colocado na bancada junto com o tripé de suporte para a sonda, sendo que a sonda, depois de aquecida na temperatura desejada, foi imediatamente introduzida verticalmente no fluido com o auxílio do suporte. No mesmo momento que ocorria a introdução da sonda no fluido, era ativado no computador o programa para a aquisição dos dados do Labjack, que foi configurado utilizando um Intervalo de 125 ms e uma resolução de 11HZ. A variação de temperatura da sonda era acompanhada no computador e, no momento que ela atingia 50°C, a aquisição dos dados era interrompida. A figura 8 mostra todo o sistema em “stand by” para o ensaio de curva de resfriamento.

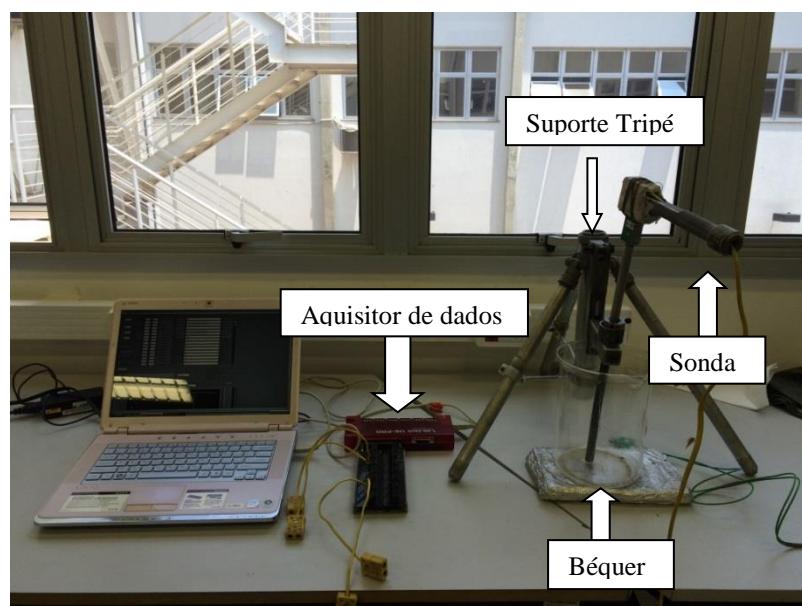


Figura 8 – Equipamentos para obtenção das curvas de resfriamento

Após o término, a sonda era retirada e lavada, sendo repetidas três vezes todo o procedimento para cada concentração dos fluidos.

Os dados obtidos pelo programa foram exportados para o Excel, gerando os gráficos de resfriamento e taxa de resfriamento de cada concentração dos fluidos.

4.2.3 Têmpera

As têmperas foram feitos com amostras de aço AISI 1045 e AISI 4140 cujas composições são descritas na tabela 3.

Tabela 3- Composição dos aços AISI 1045 e AISI 4140 obtido da empresa Quadrimetais Produtos Industriais

AISI 1045					
C	Mn	Si	P	S	Al
0,460%	0,671%	0,219%	0,015%	0,011%	0,025%
Cu	Cr	Ni	Sn	Mo	V
0,01%	0,03%	0,01%	x	0,008%	0,004%

AISI 4140					
C	Mn	Si	P	S	Al
0,410%	0,830%	0,260%	0,020%	0,010%	0,016%
Cu	Cr	Ni	Sn	Mo	V
0,10%	0,93%	0,06%	x	0,170%	x

Amarraram-se arames em cada amostra de aço individualmente, após isso, juntaram-se três amostras de um mesmo aço de forma a que eles não se tocasse formando com isso um único conjunto, como se observa na figura 9.



Figura 9 – Amostras dos Aços para têmpera

Ligou-se o forno (figura 11), deixou-se aquecendo até a temperatura de 880°C. Para evitar a descarbonetação as amostras de aço, estas foram acondicionadas em caixas metálicas preenchidas com carvão, fechadas e então colocadas no forno para austenitização, como mostram as figuras 10a e 10b, permanecendo na temperatura de 880°C por 1h depois de atingida a temperatura mostrada no controlador.



Figura 10a – Amostras cobertas com carvão em caixa metálica



Figura 10b – Caixa metálica



Figura 11 – Forno

Enquanto isso, 5L do fluido que iria ser utilizado como meio da têmpera foram colocados em um bêquer e aquecido em uma chapa até a temperatura de 40°C, com a temperatura sendo controlada com a ajuda de um termômetro, como é mostrado na figura 12.

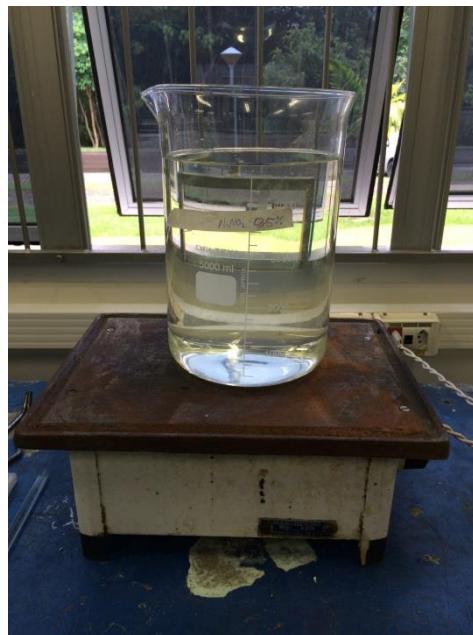


Figura 12 – Fluido sendo aquecido em chapa elétrica para têmpera

Por fim, o fluido a 40°C foi colocado em um balde metálico, no momento da retirada da caixa do forno de tratamento térmico. Abriu-se a caixa e retiraram-se rapidamente as amostras, resfriando-as no fluido em estudo, como é mostrado na figura 13.



Figura 13 – Amostras sendo resfriadas no fluido após austenização

Essa operação foi repetida para todos os aços e todas as soluções. Após isso, as amostras foram lixadas para remoção de óxidos, gerando uma superfície adequada para medição de dureza.

4.2.4 Ensaio de dureza

As medidas de dureza foram feitas em HRC, nas regiões de centro e borda. Uma média de 4 medidas foram feitas para cada região analisada. Elas foram realizadas no equipamento Leco RT-240.

4.2.5 Metalografia

Antes da realização da análise metalográfica, os aços foram cortados e embutidos em baquelite, posteriormente foram lixados, polidos e atacados em nital 2% para posterior visualização no microscópio óptico. A figura 14 mostra uma amostra embutida em baquelite.



Figura 14 – Amostra de aço embutida em baquelite

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Curvas de resfriamento

As figuras 15 a 18 representam as curvas de resfriamento e as curvas da taxa de resfriamento que foram obtidas. Todos os fluidos foram mensurados a uma temperatura de 40°C e sem agitação. Os gráficos compararam as curvas de resfriamento e a taxa de resfriamento entre as diferentes concentrações de nanofluido e a água e entre as diferentes concentrações do sal e a água.

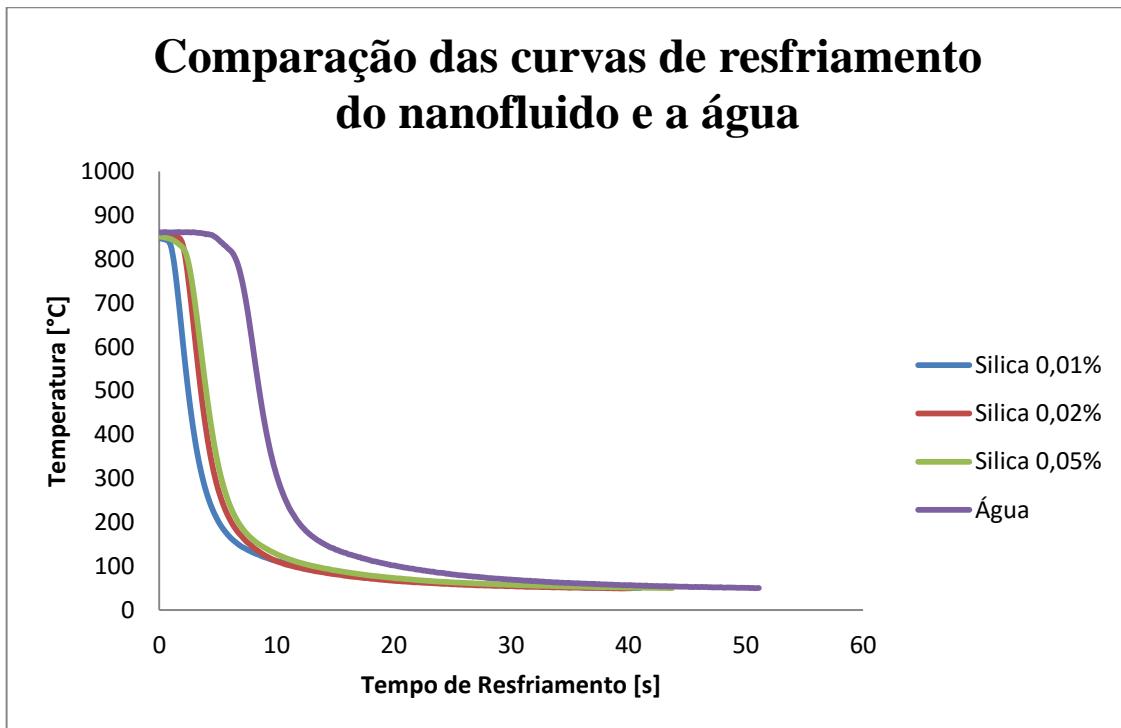


Figura 15 - Comparaçāo das curvas de resfriamento dos nanofluidos e a água

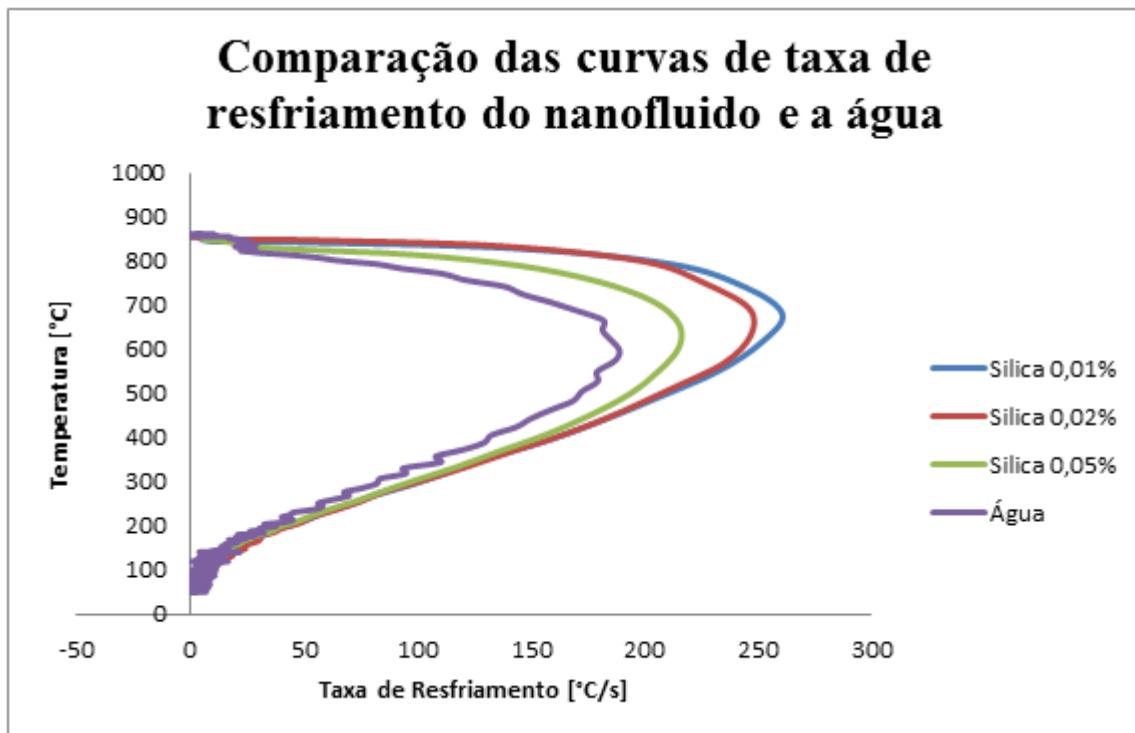


Figura 16- Comparação das curvas de resfriamento dos nanofluidos e a água

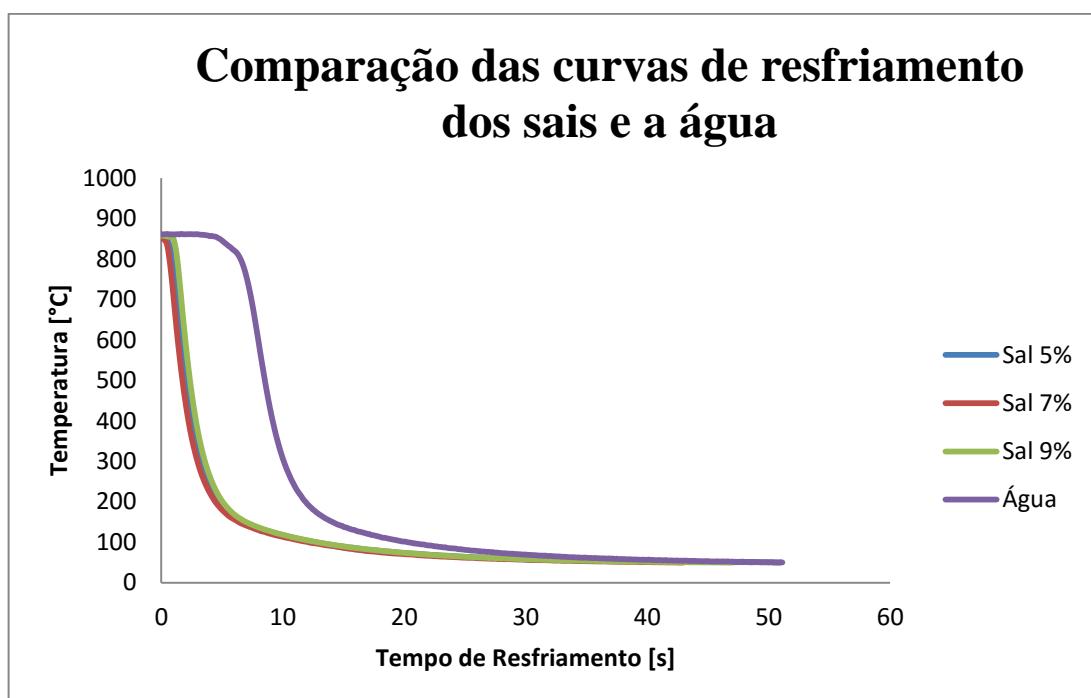


Figura 17 - Comparação das curvas de resfriamento dos sais e a água

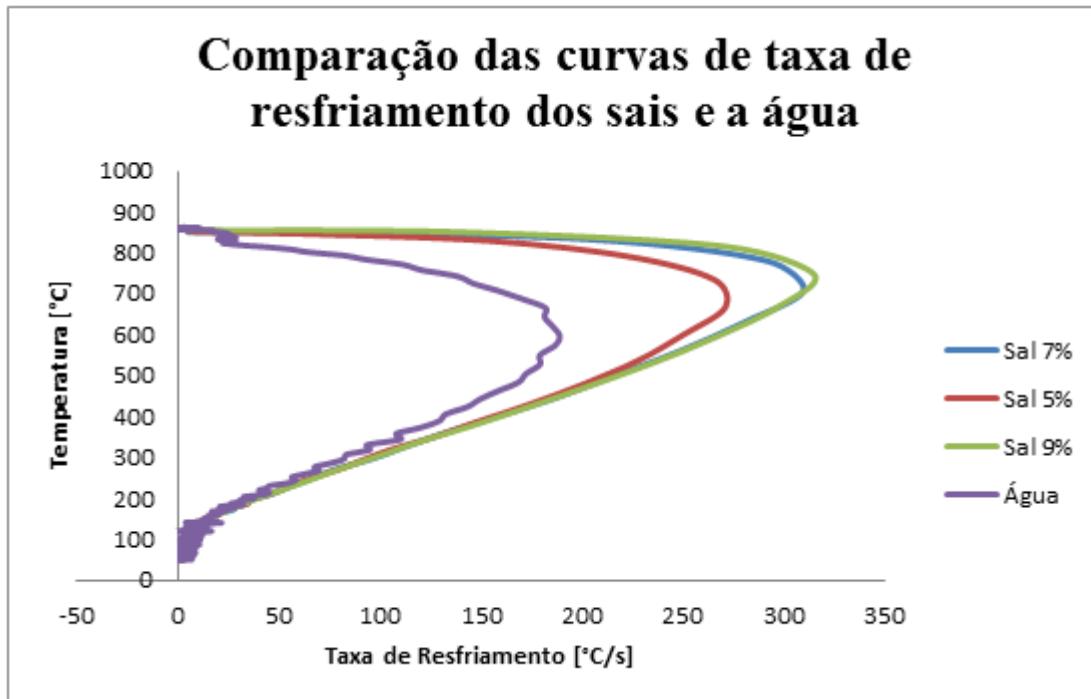


Figura 18 - Comparação das curvas de taxa de resfriamento dos sais e a água

Nos gráficos das figuras 15 e 16 pode-se observar que, para a concentração de nanofluido de 0,01%, a fase de camada de vapor é praticamente inexistente. Sua taxa de resfriamento máxima foi de 260,83°C/s, ocorrendo a uma temperatura de 679,19°C.

Para a concentração de 0,02% pode-se perceber uma pequena formação da fase de vapor, observado pelo patamar formado no início do gráfico, porém apresentando um rápido colapso. Sua taxa máxima de resfriamento foi de 246,74°C/s, ocorrendo a uma temperatura de 630,77°C.

Assim como ocorreu para a concentração de 0,02%, a concentração de 0,05% apresentou uma pequena formação de camada de vapor que também foi rapidamente colapsada, observada pelo patamar formado no início do gráfico. A taxa máxima de resfriamento foi de 215,21°C/s à temperatura de 604,76°C.

Como se pode observar nos gráficos das figuras 17 e 18, utilizando a solução aquosa de sal com concentrações de 5%, 7% e 9% o resfriamento não apresentou a formação da camada de vapor, pois não houve a formação de um patamar no início do gráfico, já ocorrendo quase que diretamente a fase de ebulação nucleada.

No caso do sal com concentração de 5%, a taxa máxima de resfriamento apresentada foi de 271,27 °C/s que foi atingida a uma temperatura de 667,94°C.

Já utilizando a solução aquosa de sal com concentração de 7%, a taxa de resfriamento máxima foi de 309,98 °C/s, ocorrendo a uma temperatura de 708,47°C. A concentração de 9% apresentou o maior valor de taxa de resfriamento, que foi de 323,83°C/s ocorrendo a uma temperatura de 743,98°C.

É notória a presença de uma pequena fase vapor no resfriamento com água, apresentando uma taxa de resfriamento bem aquém das soluções de sais.

Na curva de resfriamento da água pode se observar que ocorreu a formação da camada de vapor por um período maior em comparação aos outros fluidos, tendo ela uma duração próxima de 5 segundos, observado pelo patamar formado no início do gráfico da curva de resfriamento. A taxa de resfriamento máxima foi de 189,04°C/s, que ocorreu a uma temperatura de 596,93°C.

Observando os gráficos das figuras 15 a 18, nota-se que as soluções que apresentaram maiores taxas de resfriamento foram os fluidos de soluções aquosas de nitrito de sódio, seguidas dos nanofluidos de sílica e, por fim, a água. Assim, as soluções de sais são as que apresentam maior taxa de resfriamento, com ausência da camada de vapor devido aos íons de sais que ajudam no colapso da camada que se forma entre a peça e o líquido fazendo com que a etapa que ocorre maior extração de calor se inicie mais rapidamente. Observou-se também que, quanto maior foi o nível de concentração do sal, maior foi sua taxa de resfriamento a uma temperatura mais alta, mostrando que quanto maior a concentração, mais rapidamente a camada de vapor foi colapsada, dentro das condições estudadas.

Já com relação aos nanofluidos, a formação da camada de vapor acontece, mas ela é rapidamente destruída. Pode-se observar que, aumentando a concentração dos nanofluidos, ocorre uma piora na taxa de resfriamento, não havendo ainda na literatura uma explicação para o melhor desempenho da solução de menor concentração. Em comparação com a água, os nanofluidos melhoraram consideravelmente as taxas de resfriamento com apenas pequenas concentrações de nanopartículas, pois enquanto a água pura apresenta uma taxa de

resfriamento máxima no valor de $189.04\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, a maior taxa de resfriamento encontrada para o nanofluido foi à concentração de 0,01%, que foi de $260.83\text{ }^{\circ}\text{C/s}$.

Colocando os valores da taxa máxima de resfriamento em um gráfico de barras, pode-se verificar melhor a severidade desses fluidos, como se observa na figura 19.

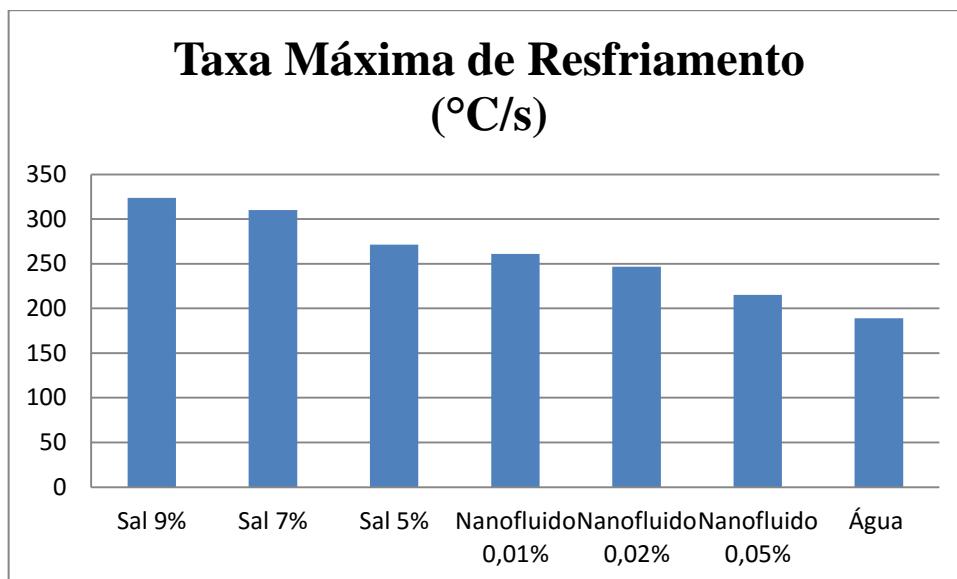


Figura 19 – Gráfico da taxa máxima de resfriamento dos fluidos

Na figura 19 pode-se observar que o fluido que apresentou uma maior taxa de resfriamento à temperatura de 40°C foi a solução de nitrito de sódio com concentração de 9%, apresentando um valor que é aproximadamente 71,30% maior que o da água e 24,15% maior que o nanofluido de 0,01%. Já o nanofluido que apresentou o maior resultado foi o de concentração de 0,01%, que apresentou um valor que é aproximadamente 37,98% maior em relação ao da água. A água obteve sua máxima taxa de extração de calor na temperatura mais baixa dentre os fluidos, pois ela apresenta uma maior estabilidade da fase de vapor.

Tradicionalmente o H de Grossman é calculado com dados da curva de resfriamento a 700°C , pois é por volta dessa temperatura que acontece a formação da perlita. Assim, esses valores foram calculados e são apresentados na tabela 4.

Tabela 4 – Valores obtidos dos cálculos a 700°C

Solução	H- Grossman (m^{-1}) - Temperatura de 700°C
Sal 5	190
Sal 7	254
Sal 9	289
Silica 0,01	167
Silica 0,02	143
Silica 0,05	125
Água	88

Acompanhando o que foi verificado para a taxa máxima, a concentração de 9% se sobressai com os maiores valores de H.

No entanto, os valores de 300°C e 200°C foram também calculados, pois, para os aços estudados, essa é a faixa de temperatura que ocorre a formação da martensita. Além disso, pode-se chegar a um valor médio do H de Grossman para os fluidos. Os valores estão mostrados na tabela 5 e o valor médio dos valores está mostrado em forma de um gráfico de barras na figura 20.

Tabela 5 – Valores obtidos dos cálculos a 300°C e 200°C

Solução	H- Grossman (m^{-1}) - Temperatura de 300°C	H- Grossman (m^{-1}) - Temperatura de 200°C
Sal 5	335	157
Sal 7	278	176
Sal 9	324	190
Silica 0,01	312	176
Silica 0,02	312	167
Silica 0,05	301	139
Água	204	106

De uma maneira geral, os fluidos que são mais rápidos a 700°C também o são nas temperaturas de 300 e 200°C. Esse é um aspecto importante de se observar, pois o ideal seria que nessas faixas de temperatura mais baixas a velocidade de resfriamento fosse também menor, já que a transformação martensítica está ocorrendo e uma melhor uniformidade no resfriamento, proporcionado por taxas menores, seria bem-vinda. Como se sabe, na faixa entre 300°C e 200°C ocorre a formação da martensita e nessa faixa prefere-se uma taxa de extração de calor menor para evitar a formação de tensões internas, podendo ocasionar trincas no material.

No entanto, na maioria dos meios de resfriamento, isso acaba não ocorrendo, ou seja, taxas maiores em altas temperaturas e taxas menores em baixas temperaturas. Algumas soluções de polímeros podem apresentar essa característica.

Entretanto nos nanofluidos a concentração de 0,01% apresentou o maior valor, porém na temperatura de 300°C ele apresentou o mesmo valor que a concentração de 0,02%. O menor valor obtido foi o da água em todas as temperaturas.

Os valores médios de Grossman calculados estão agrupados na figura 20.

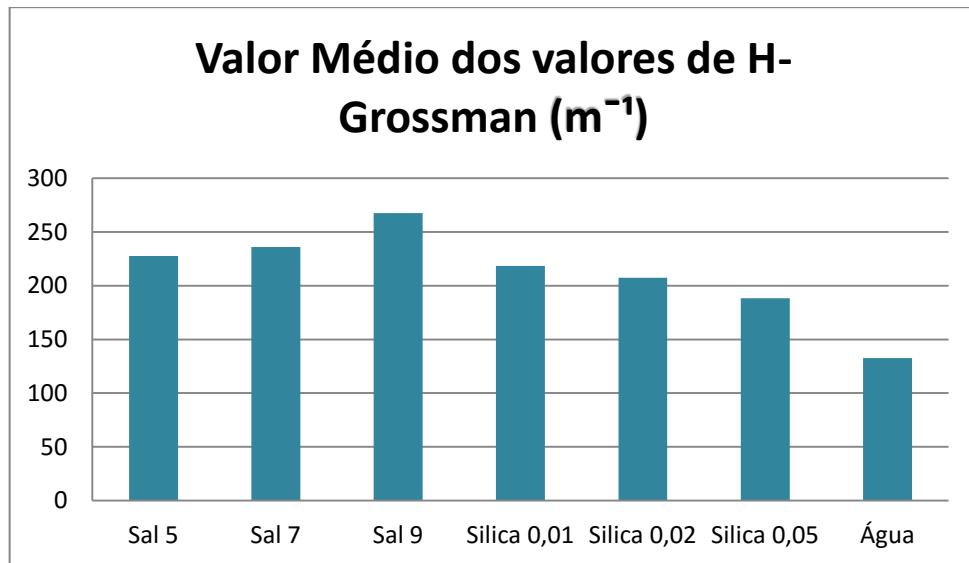


Figura 20 – Gráfico da média dos valores de H-Grossman

Como era de se esperar, o sal com concentração de 9% é o meio que apresenta a maior severidade, seguido dos sais de 7% e 5%. Entre os nanofluidos a concentração que apresentou

a maior severidade foi a de 0,01%, seguido da de 0,02% e 0,05%. Sendo a água o fluido que apresentou o menor nível de severidade.

5.2 Dureza

Os valores médios das durezas e seus desvios padrão obtidos foram colocados nas tabelas 6 e 7, bem como a porcentagem de martensita formada na estrutura. As avaliações das porcentagens de martensita foram feitas levando em conta o gráfico da figura 21.

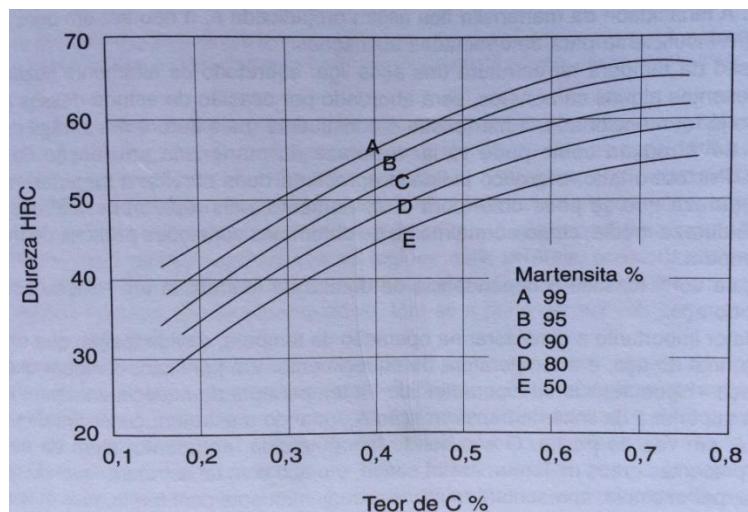


Figura 21 – Gráfico de relação de porcentagem de martensita por dureza e teor de carbono Fonte: (CHIAVERINI, V)

Para o aço AISI 1045 apenas foram feitas têmperas com as soluções de nanofluidos e as soluções salinas. Já para o aço AISI 4140 foram feitas, além dessas, para a água também.

Tabela 6 – Valores obtidos das medições de dureza aço AISI 1045

Solução	AISI 1045 - Centro	Desvio Padrão	% martensita	AISI 1045 - Borda	Desvio Padrão	% martensita
	Dureza HRC			Dureza HRC		
Nanofluido 0,01%	45	1,55	50%	59	0,60	99%
Nanofluido 0,02%	25	1,59	< 50%	59	0,39	99%
Nanofluido 0,05%	34	2,45	< 50%	59	4,33	99%
Sal 5%	59	0,50	99%	60	0,23	99%
Sal 7%	60	0,97	99%	61	0,41	99%
Sal 9%	60	0,74	99%	61	1,12	99%

Tabela 7 – Valores obtidos das medições de dureza aço AISI 4140

Solução	AISI 4140 - Centro	Desvio Padrão	% de martensita	AISI 4140 - Borda	Desvio Padrão	% martensita
	Dureza HRC			Dureza HRC		
Nanofluido 0,01%	59	0,37	99%	60	0,39	99%
Nanofluido 0,02%	58	1,66	99%	60	0,89	99%
Nanofluido 0,05%	60	1,29	99%	61	1,00	99%
Sal 5%	60	0,35	99%	61	0,20	99%
Sal 7%	61	2,08	99%	62	0,52	99%
Sal 9%	61	0,45	99%	62	0,58	99%
Água	58	1,11	99%	59	1,67	99%

Como se podem observar as soluções de nanofluido não conseguiram temperar as amostrar do aço AISI 1045, pois não conseguiram obter mais que 50% de martensita em seu centro, apenas a região da borda da peça. Já as soluções de sais conseguiram obter 99% de martensita em toda a peça.

As amostras do aço AISI 4140 conseguiram ser temperadas com 99% de martensita em seu centro para todas as soluções dada a sua maior temperabilidade quando comparado ao aço AISI 1045.

As soluções do sal conseguiram temperar todas as amostras, mostrando a elevada severidade típica dos sais. Já as soluções de nanofluido apresentaram um desempenho pior que os sais. A melhor concentração foi a de 0,01% que conseguiu 50% de martensita no centro da amostra do aço AISI 1045.

5.3 Metalografia

As figuras 22 a 28 mostram a microestrutura dos aços após a realização do processo de têmpera.

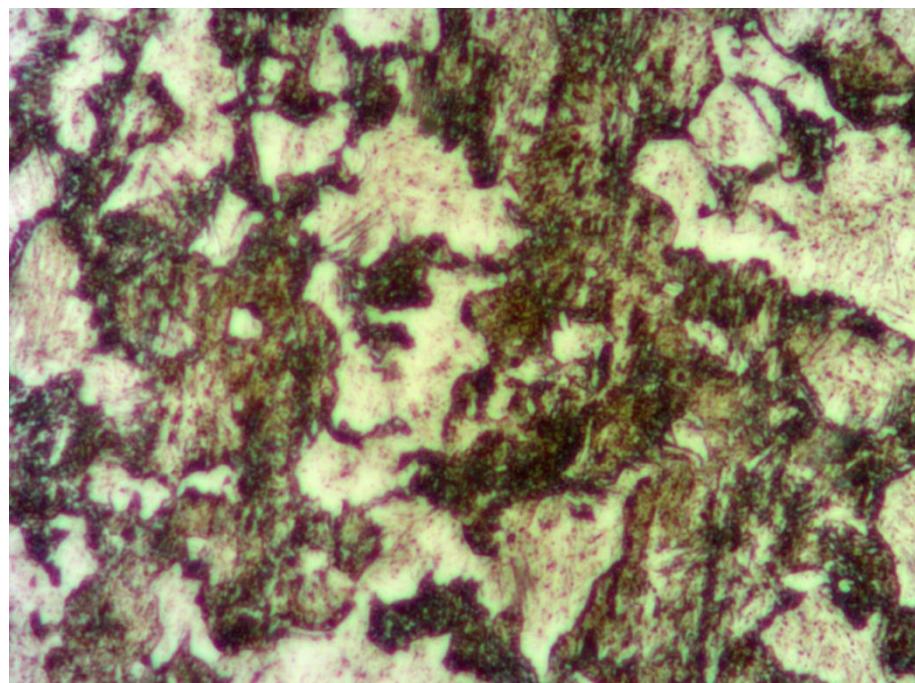


Figura 22 – Microestrutura da região central do aço AISI 1045 temperado em nanofluido de sílica com concentração 0,01%. Presença de áreas escuras de perlita e brancas de ferrita, pouca presença de martensita. Atacado com nital 2%. Aumento de 1000X

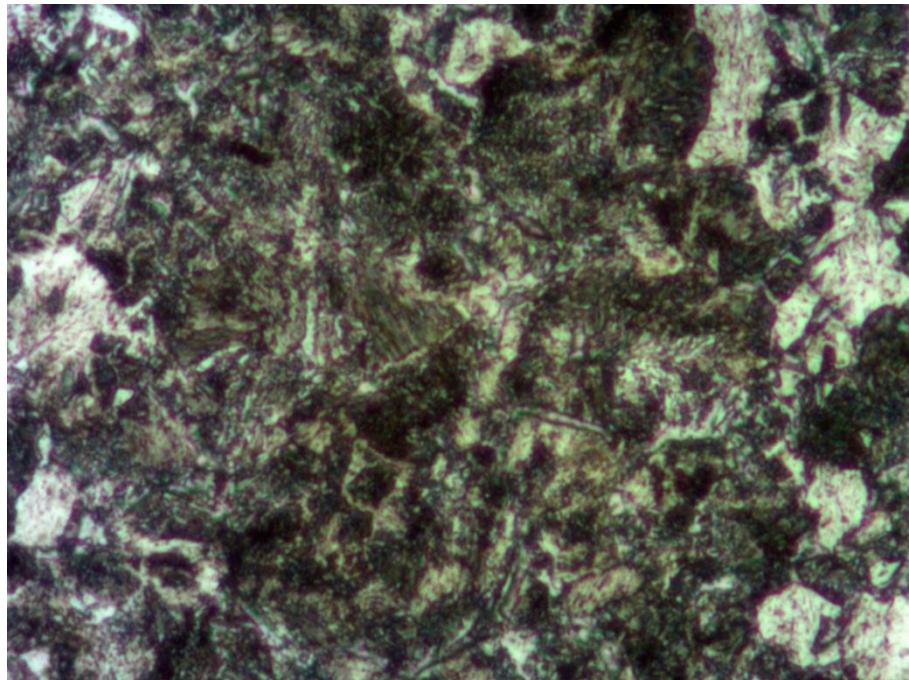


Figura 23 – Microestrutura da região central do aço AISI 1045 temperado em nanofluído de sílica com concentração 0,02%. %. Presença de áreas escuras de perlita e brancas de ferrita, pouca presença de martensita. Atacado com nital 2%. Aumento de 1000X

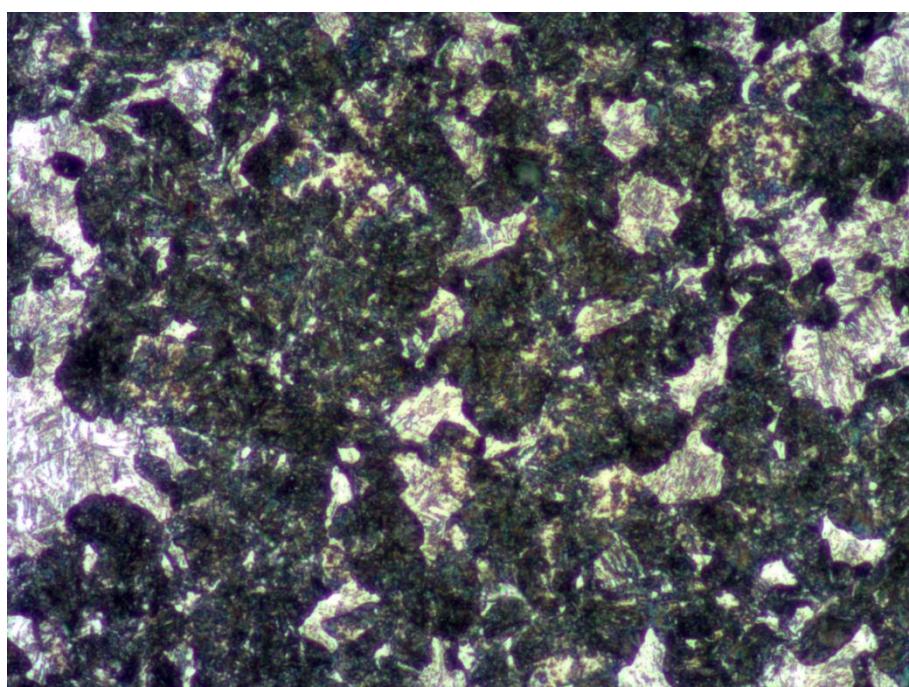


Figura 24 – Microestrutura da região central do aço AISI 1045 temperado em nanofluído de sílica com concentração 0,05%. %. Presença de áreas escuras de perlita e brancas de ferrita, pouca presença de martensita. Atacado com nital 2%. Aumento de 1000X

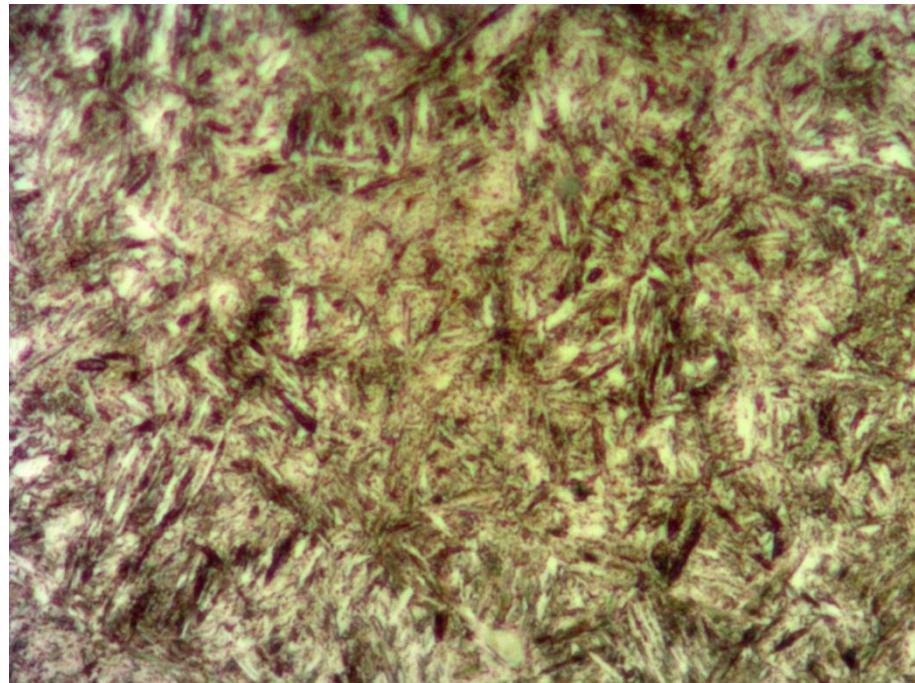


Figura 25 – Microestrutura da região da borda do aço AISI 1045 temperado em solução aquosa de nitrito de sódio 7%. Presença de grande quantidade de martensita e poucas áreas escuras de perlita. Atacado com nital 2%. Aumento de 1000X

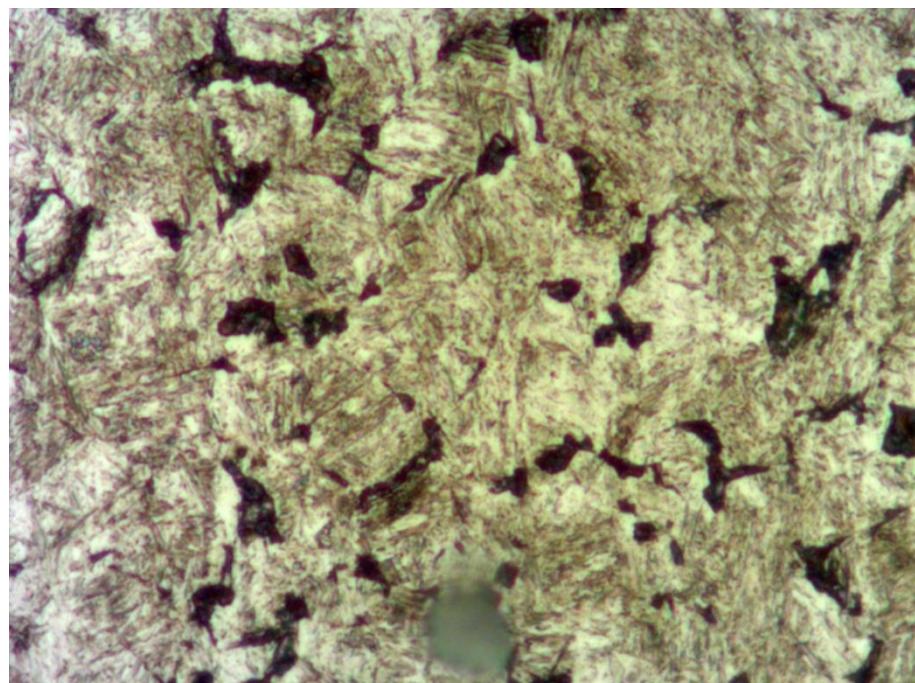


Figura 26 – Microestrutura da região central do aço AISI 1045 temperado em solução aquosa de nitrito de sódio 7%. Presença de grande quantidade de martensita nas áreas claras e poucas áreas escuras de perlita. Atacado com nital 2%. Aumento de 1000X

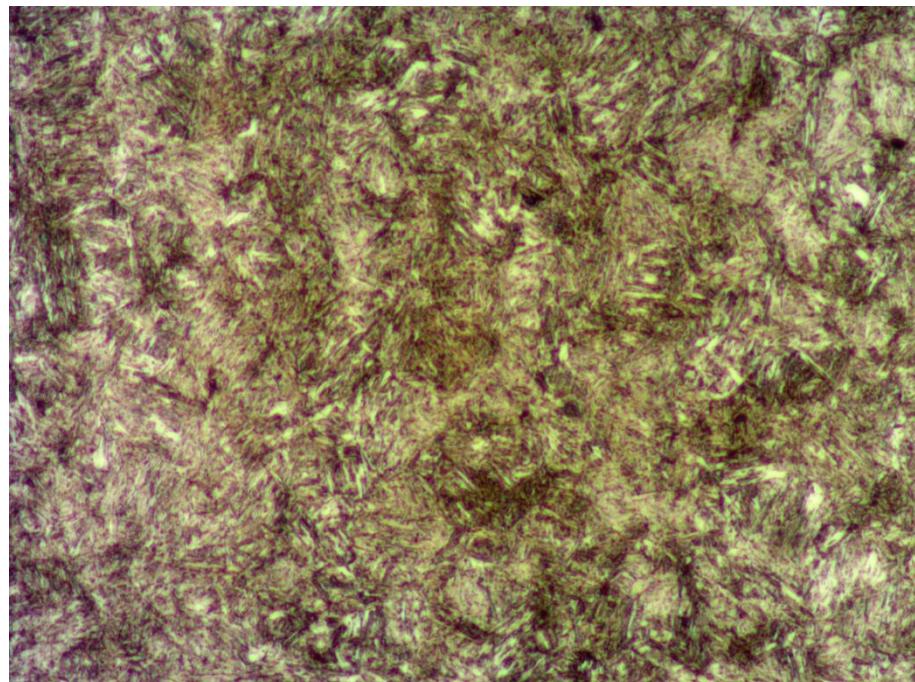


Figura 27 – Microestrutura da região central do aço AISI 4140 temperado em solução aquosa de nitrito de sódio 7%. Presença de grande quantidade de martensita e poucas áreas escuras de perlita. Atacado com nital 2%. Aumento de 500X

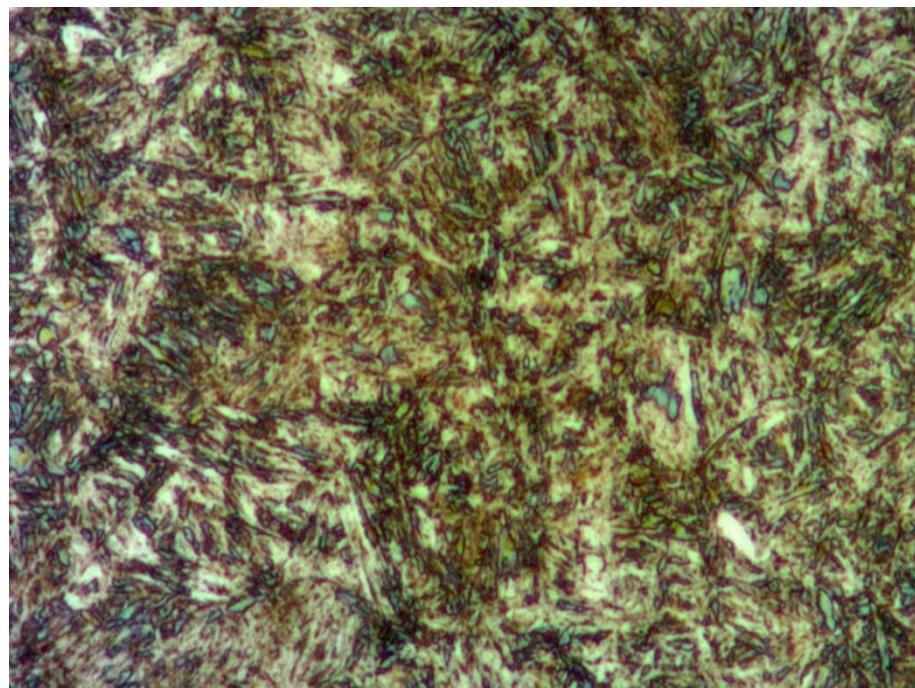


Figura 28 – Microestrutura da região da borda do aço AISI 4140 temperado em solução aquosa de nitrito de sódio 7%. Presença de grande quantidade de martensita e poucas áreas escuras de perlita. Atacado com nital 2%. Aumento de 1000X

Nas figuras 22 a 24 observa-se a microestrutura encontrada nas amostras dos aços AISI 1045 na região central que foram temperados com os nanofluidos com as concentrações de 0,01%, 0,02% e 0,05% respectivamente. Encontrou-se pouca martensita formada, com grande quantidade de perlita (região escura) e ferrita (região clara) em sua microestrutura, justificando-se a baixa dureza encontrada nas amostras.

A figura 25 representa a região da borda de todas as amostras do aço AISI 1045 temperadas, pois todas as amostras conseguiram valores próximos de dureza, representando a formação de 99% de martensita.

A figura 26 representa a microestrutura encontrada na região central do aço AISI 1045 para todas as amostras temperadas com o nitrito de sódio. Em todas as concentrações foram obtidos valores próximos de dureza e a formação de 99% de martensita.

Nas figuras 27 e 28 observam-se as regiões centrais e de borda respectivamente para o aço AISI 4140 temperado. Elas representam as microestruturas de todas as amostras, pois todos os fluidos obtiveram valores semelhantes de dureza em suas amostras, com a formação de 99% de martensita.

6 CONCLUSÕES

As soluções de nanofluido de sílica apresentaram um desempenho inferior em comparação às soluções aquosas de nitrito de sódio como meio de têmpera, pois, nenhuma concentração de nanofluido conseguiu temperar o aço AISI 1045. Já o sal mostrou uma elevada severidade, conseguindo temperar os aços AISI 1045 e AISI 4140 com 99% de martensita formada para todas as concentrações do sal.

Obviamente ficou patente que o aço AISI 4140 possui maior temperabilidade em relação ao aço AISI 1045, pois conseguiu ser temperado por todos os fluidos, inclusive pelos que apresentaram menor severidade, não acontecendo o mesmo para o aço AISI 1045 que conseguiu apenas ser temperado pelos fluidos com maior severidade.

Portanto, apesar de estudos mostrarem que os nanofluidos apresentam um elevado potencial como meio de têmpera, ainda precisam ser mais estudados e compreendidos, já os sais mostraram melhor desempenho.

REFERÊNCIAS

BARBER, J.; BRUTIN, D; TADIRST, L.. A Review on Boiling Heat Transfer Enhancement with Nanofluids. *Nanosclae Research Letters*, 2011, 6:280

CANALE, L. C. F.; TOTTEN, G. E. **Hardening of Steel.** Em: Liščić, B.. Quenching Theory and Technology, Boca Renton, Fl, USA: CRC Press, 2010. Cap. 1, p. 1-42.

CHIAVERINI, V.. Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 7.ed ampl e rev. São Paulo, 2008.

CHOI, S. U. S.; EASTMAN. J.A Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles, Energy Technology Division and Materials Science Division, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, 1995

CHUNG, J.N.; CHEN, T.; MAROO, S.C.. A review of recent progress on nano/micro scale nucleate boiling fundamentals. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, 2011

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A.. Ensaio dos Materiais. Rio de Janeiro, 2008

KIRUBADURAI, B.; SELVAN, P.; VIJAYAKUMAR, V.; KARTHIK, M.. Heat Transfer Enhancement of Nano Fluids – A Review. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol. 03, Jul 2014

KORAD, T.; POLBOON, M; CHUMCHERY, N; PEARCE, J.. Improving quench hardening of low carbon steel. National Metal and Materials Technology Center, Klong Luang, Journal of Metals, Materials and Minerals, Vol. 21, No. 1, pp 67-74, 2011

MARTINS, M.. Temperabilidade Jominy e influência do revenido sobre a dureza – Um estudo em aços estruturais e nacionais. Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Florianopolis, Março de 2002.

Mestre da Solda. Metalurgia da soldagem. Disponível em <<http://mestredasolda.blogspot.com.br/2011/09/metallurgia-da-soldagem-estudo.html>> Acesso em: 9 de novembro de 2015.

MOHAMAD, A.A.. **Myth about nano-fluid heat transfer enhancement.** International Journal of Heat and Mass Transfer 86, 397-403, 2015

OTERO, R. L. S.. **Calculation of Kobasko's Simplified Heat Transfer Coefficients from Cooling Curve Data Obtained with Small Probes.** Journal Of Astm International, São Carlos, abr. 2012.

PETROFER INDUSTRIAL OILS AND CHEMICALS. **Quenachants for the heat-treatment of steel, cast iron and aluminium alloys.** Germany.

PRABHU, K. N.. **Wetting Kinetics and Quench Severity of Selected Vegetable Oils for Heat Treatment.** Em: Liščić, B.. Quenching Theory and Technology, Boca Raton, Fl, USA: CRC Press, 2010. Cap. 8, p. 205-228.

PRABHU, K. N.; JAGANNATH, V.. **Severity of Quenching and Kinetics of Wetting of Nanofluids and Vegetable Oils.** Journal Of ASTM International, Vol. 6, No.3

PRABHU, K.N.; FERNANDES, P.. **Heat Transfer During Quenching and Assessment of Quench Severity - A Review.** Journal of ASTM International, Vol. 6, No.3

RAMESH, G.; PRABHU, K.N.. **Review of Thermo-Physical Properties, Wetting and Heat Transfer Characteristics of Nanofluids and their Applicability in Industrial Quench Heat Treatment.** Nanoscale Research Letters, 2011, 6:334

SILVA, A.L.V.C.; MEI, P.R.. **Aços e Ligas Especiais.** 2^a Edição Revista e Ampliada, São Paulo 2006.

TENSI, H. M.. **Wetting Kinematics** Em: Liščić, B.. Quenching Theory and Technology, Boca Raton, Fl, USA: CRC Press, 2010. Cap. 7, p. 179-204.

TIWARY, V.; PATIL, A.; MULLA, Z.; BHA, C.I.. **Prediction of quench severity of various quench media.** International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering. Vol. 1, Issue 3, 2014

TOTTEN, G.E.; BATES, C.E.; CLINTON, N.A.. **Handbook of Quenchants and Quenching Technology.** Materials Park, OH: ASM Internacional, 1993.

WOLF, F.G.. **Modelagem da Interação Fluido-sólido para Simulação de Molhabilidade e Capilaridade Usando o Modelo Lattice-Boltzmann.** Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2006

XUAN, Y.; ROETZEL,W.. **Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids.** International Journal of Heat and Mass Transfer 43, 2000.

ZUPAN, J.; FILETIN, T.; LANDEK, D.. **The effect of TiO_2 nanoparticles on fluid quenching characteristics.** International Heat Treatment and Surface Engineering, Vol. 6, No. 2, 2012

ANEXO 1 - Propriedades termo físicas da sonda

Propriedade	Temperatura (°C)						
	100	200	300	400	500	600	700
Condutividade térmica – (W/mK)	14.2	16	17.8	19.7	21.7	23.7	25.9
Difusividade térmica – ($\times 10^{-6}$ m ² /s)	3.7	4.1	4.3	4.8	5.1	5.4	5.6

Figura A1 – Tabela com as propriedades termo físicas do INCONEL 600 em diferentes temperaturas Fonte: (OTERO, R. L. S)

ANEXO 2 - Correlação entre número de Biot generalizado (Bi_v), Critério de campo de temperatura (ψ) e número de Kondratjev (Kn)

Bi_v	ψ	Kn	Bi_v	ψ	Kn	Bi_v	ψ	Kn
0.00	1.00000	0.00000	0.68	0.64000	0.43536	1.95	0.36263	0.70712
0.01	0.99284	0.00993	0.70	0.63297	0.44308	2.00	0.35637	0.71274
0.02	0.98574	0.01971	0.72	0.62585	0.45061	2.05	0.35032	0.71816
0.04	0.97171	0.03887	0.74	0.61887	0.45796	2.10	0.34447	0.72338
0.06	0.95791	0.05747	0.76	0.61200	0.46513	2.15	0.33880	0.72841
0.08	0.94434	0.07555	0.78	0.60531	0.47214	2.20	0.33331	0.73328
0.10	0.93101	0.09310	0.80	0.59873	0.47898	2.25	0.32799	0.73797
0.12	0.91792	0.11015	0.82	0.59227	0.48566	2.30	0.32283	0.74251
0.14	0.90507	0.12671	0.84	0.58594	0.49319	2.35	0.31783	0.74690
0.16	0.89246	0.14279	0.86	0.57973	0.49857	2.40	0.31298	0.75115
0.18	0.88009	0.15842	0.88	0.57364	0.50480	2.45	0.30827	0.75525
0.20	0.86796	0.17359	0.90	0.56766	0.51089	2.50	0.30369	0.75923
0.22	0.85607	0.18833	0.92	0.56179	0.51851	2.55	0.29925	0.76309
0.24	0.84441	0.20266	0.94	0.55604	0.52268	2.60	0.29493	0.76682
0.26	0.83298	0.21657	0.96	0.55039	0.52837	2.65	0.29074	0.77045
0.28	0.82178	0.23010	0.98	0.54484	0.53395	2.70	0.28665	0.77396
0.30	0.81081	0.24324	1.00	0.53940	0.53940	2.75	0.28268	0.77737
0.32	0.80007	0.25602	1.05	0.52622	0.55253	2.80	0.27882	0.78069
0.34	0.78954	0.26844	1.10	0.51362	0.56498	2.85	0.27505	0.78390
0.36	0.77923	0.28052	1.15	0.50157	0.57680	2.90	0.27139	0.78703
0.38	0.76913	0.29227	1.20	0.49003	0.58804	2.95	0.26782	0.79007
0.40	0.75923	0.30369	1.25	0.47898	0.59873	3.00	0.26434	0.79302
0.42	0.74954	0.31481	1.30	0.46839	0.60891	3.05	0.26095	0.79590
0.44	0.74005	0.32562	1.35	0.45823	0.61861	3.10	0.25764	0.79870
0.46	0.73076	0.33615	1.40	0.44848	0.62787	3.15	0.25442	0.80142
0.48	0.72166	0.34640	1.45	0.43911	0.63672	3.20	0.25127	0.80407
0.50	0.71274	0.35637	1.50	0.43011	0.64517	3.25	0.24820	0.80665
0.52	0.70401	0.36608	1.55	0.42146	0.65326	3.30	0.24520	0.80917
0.54	0.69545	0.37555	1.60	0.41312	0.66100	3.35	0.24228	0.81162
0.56	0.68708	0.38476	1.65	0.40510	0.66842	3.40	0.23942	0.81402
0.58	0.67887	0.39374	1.70	0.39737	0.67553	3.45	0.23662	0.81635
0.60	0.67082	0.40249	1.75	0.38992	0.68236	3.50	0.23389	0.81863
0.62	0.66294	0.41103	1.80	0.38273	0.68892	3.55	0.23122	0.82085
0.64	0.65522	0.41934	1.85	0.37580	0.69523	3.60	0.22862	0.82302
0.66	0.64766	0.42745	1.90	0.36910	0.70129	3.65	0.22606	0.82513

Figura A2 – Tabela da correlação entre número de Biot generalizado (Bi_v), Critério de campo de temperatura (ψ) e número de Kondratjev (Kn) Fonte: (OTERO, R. L. S).

