

Caracterização das trocas térmicas de aço médio-carbono resfriado sob concentrações distintas de polivinilpirrolidona

Characterization of thermal exchanges of medium-carbon steel cooled under different concentrations of polyvinylpyrrolidone

Eduardo da Rosa Vieira¹
 Rodrigo Jorge Macedo²
 Vagner Machado Costa³
 Guilherme Schumacher da Silva⁴
 Luciano Volcanoglo Biehl⁵
 Jorge Luis Braz Medeiros⁶

Resumo

A têmpera é um procedimento térmico que busca a obtenção da microestrutura martensítica, visando melhoria nas propriedades dos materiais metálicos. O tratamento ocorre pelo aquecimento da peça, até que austenita seja obtida na sua composição, seguido de resfriamento, que deve ser rápido, impedindo que o carbono seja difundido no material. Esse resfriamento ocorre geralmente pela imersão do corpo sob alta temperatura em fluidos refrigerantes. Nesse sentido, existe a necessidade de taxas de resfriamento elevadas do corpo, provocadas pelo contato com o fluido, minimizando rapidamente sua temperatura. Atualmente, os fluidos poliméricos diluídos em água vêm sendo utilizados para esse tratamento, posto que apresentam avanços em relação às demais classes de fluidos. Esses fluidos variam de forma relevante os níveis de transferência de calor, conforme a concentração é alterada na solução. Neste trabalho, as variações de temperaturas e taxas de variação térmica entre corpo e fluido foram avaliadas, empregando quatro concentrações de solução polimérica de polivinilpirrolidona (PVP), com percentuais entre 10 e 25%.

Palavras-chave: Curvas de Resfriamento. Têmpera. Polivinilpirrolidona.

Abstract

Quenching is a thermal procedure that seeks to obtain the martensitic microstructure, aiming at improving the properties of metallic materials. The treatment occurs by heating the piece until austenite is obtained in its composition, followed by cooling, which must be rapid, preventing the carbon from being diffused into the material. This cooling usually occurs by immersing the body under high temperature in refrigerants. In this sense, there is a need for high cooling rates in the body, caused by contact with the fluid, quickly minimizing its temperature. Currently, polymeric fluids diluted in water have been used for this treatment, since they have advances in relation to other classes of fluids. These fluids significantly change the levels of heat transfer, as the concentration changes in the solution. In this work, temperature variations and rates of thermal variation between body and fluid were evaluated, using four concentrations of polymeric solution on polyvinylpyrrolidone (PVP), with percentages between 10 and 25%.

Keywords: Cooling curves. Quenching. Polyvinylpyrrolidone.

1 Doutorando em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil e mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, RS. <https://orcid.org/0000-0002-6343-3255>. E-mail: vieira.r.eduardo@hotmail.com

2 Doutorando em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), Pelotas, RS e mestre em Engenharia Mecânica pela FURG. Professor no Instituto Federal do Rio Grande do Sul (IFRS), Rio Grande. <https://orcid.org/0000-0003-3764-3264>. E-mail: rodrigo.macedo@riogrande.ifrs.edu.br

3 Doutorando e mestre em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela UFRGS. Professor no IFRS, Rio Grande. <https://orcid.org/0000-0002-9299-0042>. E-mail: vagner.costa@riogrande.ifrs.edu.br

4 Doutorando em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil e mestre em Engenharia pela Universidade Federal do Pampa (Unipampa), Alegrete, RS. <https://orcid.org/0000-0003-1300-6498>. E-mail: guilherme-schumacher-silva@hotmail.com

5 Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela UFRGS. Professor na FURG. <https://orcid.org/0000-0002-5415-5863>. E-mail: luciano.biehl@furg.br

6 Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela UFRGS. Professor na FURG. <https://orcid.org/0000-0003-3468-7632>. E-mail: jorge.braz@furg.br

1 Introdução

A têmpera tem como propósito aumentar resistência mecânica, juntamente com a dureza dos materiais metálicos. Para que ocorra essa alteração nas propriedades, deve acontecer uma alteração microestrutural no aço. A microestrutura, desejada ao final do tratamento, é martensítica, que se desenvolve por uma transformação cristalina, sem difusão, tendo como base a austenita (ASM INTERNATIONAL, 1990). O fator principal para que essa mudança ocorra, é que a peça seja aquecida em temperaturas altas que possam garantir sua completa austenitização. Esse processo deve ser resfriado de maneira suficientemente veloz, para que o não haja difusão dos átomos de carbono (CIVERA *et al.*, 2014). Esse rápido arrefecimento da peça, em grande parte das situações, ocorre com a imersão do material aquecido em um líquido, o qual se encontra próximo da temperatura ambiente. Essa amplitude térmica entre o material aquecido e o fluido, a temperaturas relativamente baixas, desencadeia altas taxas de transferência de calor nesse processo (TOTTEN; TENSI; LAINER, 1999).

A mudança das células unitárias de Cúbicas com Faces Centradas (CFC) para Tetragonais com Corpos Centrados (TCC) promove a expansão volumétrica da célula unitária entre 2 e 4%, dependendo da porcentagem de carbono da liga ferrosa (MOYER; ANSELL, 1974). Essa expansão desenvolve tensões residuais nas peças ao fim do tratamento, visto que as camadas com resfriamento mais rápido, expandem primeiro, comprimindo outras partes do corpo. Essas tensões são definitivas sobre os elementos sólidos e se renovam somente com a execução de um novo procedimento, seja ele térmico ou mecânico (NEVES *et al.*, 2014). Via de regra, as camadas superficiais do material são submetidas a razões de resfriamento altas, transformando-se em martensita, antes das camadas internas, assim, comprimindo o núcleo do corpo. Já o núcleo reage e causa um esforço trativo na superfície (FERNÁNDEZ *et al.*, 2017). Um fator de alta relevância é quando essas tensões possuem magnitudes elevadas, podem ocorrer distorções permanentes e trincamentos no corpo submetido ao tratamento térmico (GRUM; BOZIC, 2005).

Quando a peça austenitizada é posta em contato direto com o líquido, em temperatura ambiente, a alta temperatura do corpo promove a evaporação desse fluido e são desenvolvidas as três etapas do tratamento. A primeira, chamada de camada de vapor, a intermediária, de ebulição e a última, de convecção. A primeira etapa, caracteriza-se pela vaporização do líquido que se anexa nas faces externas do corpo,

permitindo transferência de calor, somente por radiação e desenvolvendo níveis reduzidos de taxa de mudança de temperatura (PATROCÍNIO, 1999). Quando a camada vaporizada é extinta, é iniciada a segunda etapa, na qual o material em contato direto com o líquido, desencadeia bolhas de ar que se afastam da superfície rapidamente. Assim, a ebulição se caracteriza pela maior troca térmica do tratamento (CHEN; ZHOU, 2002). Por fim, quando a temperatura do corpo é baixa e é incapaz de causar ebulição, o material entra na fase de convecção, novamente desenvolvendo alteração de temperatura em baixos patamares, resfriando lentamente até o equilíbrio térmico entre corpo e meio fluido (MACKENZIE, 2014).

A agitação do fluido é um parâmetro de processo com alta influência na capacidade refrigerante do meio. Durante a primeira fase do tratamento, a movimentação do líquido abrevia a duração de manta de vapor, rompendo mais rapidamente essa camada. Na ebulição, ocorre um destacamento mais efetivo das bolhas, as quais apresentam menores dimensões e maior quantidade. Por fim, na convecção a circulação mais intensa de fluido permite o arrefecimento intensificado do material. Logo, quanto maior a intensidade da agitação, mais alta será a troca térmica (SEDIGHI; MCMAHON, 2000).

Nos fluidos tradicionais de têmpera, como óleo e água, a quebra da camada vaporizada não ocorre uniformemente. Nesses casos, a mudança de fase da têmpera se inicia na base inferior do material e vai se desenvolvendo gradualmente até sua extremidade mais elevada. A extinção gradual da manta de vapor impõe ao material diferentes taxas de trocas térmicas simultaneamente. Dessa forma, após o processo, obtemos diferentes propriedades ao longo material. Além disso, esse gradiente de trocas de calor aumenta os efeitos deletérios no material, porque as camadas inferiores se transformam primeiro em martensita, aumentando a própria rede cristalina e comprimindo as camadas superiores. Assim, as tensões são elevadas de forma mais intensa, aumentando o risco de dano permanente ao material (HERNANDEZ; MORALES, 2009).

Os polímeros aquosos são fluidos que se baseiam na mistura de polímeros orgânicos com água. Ao contrário da maioria dos fluidos comuns, essas soluções não desenvolvem uma de quebra da manta de vapor gradual, o qual ocorre pelo colapso simultâneo em todo o corpo, minimizando severamente os efeitos deletérios finais no material e possibilitando a uniformidade de propriedades ao longo da peça. Afora isso, esses fluidos vêm ganhando destaque no mercado, posto que apresentam vantagens adicionais como a flexibilidade no processo, biodegradabilidade,

e não serem tóxicos ou inflamáveis (KOUDIL; IKKENE; MOUZALI, 2014).

A flexibilidade se manifesta pelo fato de que podemos adequar o potencial de remoção de calor, conforme a concentração do fluido. Em situações normais, quanto maior for quantidade de soluto na solução, menores serão as taxas térmicas por ele desenvolvidas. O resfriamento do SAE 1040, em solução polimérica de polialquilenoglicol (PAG) em 5, 10, 25, 50, 75 e 100% de concentração e, tendo água como comparação de resultados, demonstraram que os resultados para 5 e 10% foram bastante semelhantes ao da água, embora em 5% tenha se obtido taxas de transferência de energia térmica, ligeiramente mais altas que nos outros fluidos. Para as outras concentrações, as taxas de trocas térmicas foram severamente minimizadas, obtendo índices de martensita de 30, 14 e 1%, para os percentuais poliméricos respectivos de 25, 50 e 75% de concentração. Já o PAG puro – sem acréscimo de solvente – não obteve êxito no processo, formando somente bainita, perlita e ferrita (RAMESH; PRABHU, 2016).

O polímero polivinilpirrolidona é o fluido que, em comparações com os outros utilizados como soluções de arrefecimento, promove uma minimização da primeira etapa da têmpera, porquanto há prolongamento da segunda e da terceira fase. Tal fato é possível, visto que o esse polímero não é evaporado de forma total com água e se anexa à amostra, tornando o filme mais instável e propensa à quebra. Assim como os demais polímeros, a solução de PVP é influenciada diretamente pela quantidade de soluto no fluido. Esse fato decorre, pois o aumento de soluto na mistura incrementa a viscosidade do líquido, o que torna a camada de vapor mais espessa e estável, dificultando sua extinção (RAMESH; PRABHU, 2016). Ramesh e Prabhu (2014) demonstraram que o acréscimo de 2 e 4% de PVP à água pode desencadear um aumento elevado de viscosidade à solução de respectivamente 48 e 128%. Nesse sentido, a taxa refrigerante da água foi de 202°C/s, enquanto 2% foi de 171°C/s e 4% de PVP desenvolveu 144°C/s.

Um estudo comparativo entre PVP e PAG, sob mesma concentração, de 16%, demonstrou que, sob 704°C, fase de ebulição, o PVP desenvolve taxas até 51,5% mais elevadas que o PVP, quando o processo não tem agitação. Quando submetida uma agitação de 0,75 m/s, essa diferença cai para 30,6%. No entanto, em temperaturas de 204°C o PAG possui taxas 54,4% mais elevadas que o PVP parado e aplicando a mesma agitação supracitada, essa diferença cai para 13,3% (HILDER, 1986).

O PVP aplicado em concentrações de 2,5; 5; 10 e 15% em resfriamento do SAE 5145, evidenciou a

perda de potencial refrigerante, conforme o incremento da concentração. Esse estudo utilizou o PVP em 30°C e sem agitação do fluido. Dessa forma, depreendeu-se que para 10 e 15% obteve-se comportamento semelhante em relação às taxas de arrefecimento máximas, as quais ficaram próximas a 150°C/s. Em sua vez, para 5% obteve uma leve elevação para aproximadamente 160°C/s. Nas amostras arrefecidas em 15%, houve um aumento mais acentuado de mudança térmica, alcançando aproximadamente 200°C/s (KOUDIL; IKKENE; MOUZALI, 2014).

Esse estudo objetiva observar a influência do incremento de PVP no comportamento térmico da solução durante a têmpera. Assim, serão estudadas curvas e taxas de mudança térmica, durante a imersão de aços AISI 1045. Dessa maneira, devidamente instrumentadas para captação de temperatura, foram temperadas amostras desse aço em concentrações iguais a 10, 15, 20 e 25% de polivinilpirrolidona, garantindo que requisitos de processo fossem constantes para todas as amostras.

2 Materiais e métodos

Para o trabalho, foram preparados corpos de prova de aço 1045, fabricados pela Gerdau. Eles foram concebidos em formato cilíndrico, com diâmetro igual a 25,4mm e comprimento de 10mm. Para cada concentração de resfriamento, três amostras foram aplicadas, uma como prova dos resultados e outra como contraprova. Antes do tratamento térmico, foi realizada uma análise química do material, visando assegurar que a composição dos elementos estava em consonância com os padrões estabelecidos pela *American Society for Metals* (ASM). Essa análise foi executada, utilizando espectrometria óptica, em um espectrômetro modelo Foudry-Master Pro.

Os fluidos selecionados possuíam concentrações iguais a 10, 15, 20 e 25% de PVP, obtidas pela diluição do polímero tendo água como solvente. O produto empregado foi o Durquench 90, marca Durferrit. A viscosidade dos fluidos, medida em centistokes (cSt), está demonstrada pela tabela 1:

Tabela 1- Viscosidade cinemática para cada concentração

| Concentração | Viscosidade Cinemática (cSt) |
|--------------|------------------------------|
| 10% | 2,97 |
| 15% | 4,96 |
| 20% | 6,81 |
| 25% | 9,96 |

Fonte: Os autores (2019).

O tratamento térmico foi realizado, inicialmente, pela austenitização do metal em 880°C, com tempo de encharque igual a 60 minutos. O aquecimento ocorreu em forno resistivo, marca EDG 3000. Após, as peças foram arrefecidas nas diferentes soluções poliméricas. As soluções estavam depositadas em um tanque acrílico, contendo de 5000 cm³ do fluido, sob temperatura ambiente. Nesse tanque, havia uma bomba recirculatória, a qual realizava a agitação do líquido, com velocidade de 0,7 m/s. Em uma próxima etapa, as peças foram revenidas a 180°C, pelo intervalo de 60 minutos, visando aliviar as tensões provenientes dos da têmpera.

A aquisição dos dados de temperaturas foi

realizada durante a têmpera, visando a construção das curvas de temperatura e taxas refrigerantes. Para esse processo, os corpos foram instrumentados, utilizando dois termopares tipo K, um deles no centro das amostras, aproximadamente a 5mm, no sentido axial, e 12,7mm de distância da superfície na direção do raio. Já o outro termopar foi inserido a 5mm, no sentido axial, e 1mm no radial, visando a avaliação próxima da superfície. Os termopares foram conectados a uma placa multifuncional de aquisição de dados marca National Instruments, modelo Daqmx 6212. Os dados foram exportados automaticamente da placa para o *software Microsoft Excel*, e as curvas foram construídas, a partir desses dados, no *software Origin 8*.

Tabela 2 - medição dos elementos do AISI 1045

| AISI 1045 | | | | |
|-------------|-----------|-----------|----------|----------|
| Porcentagem | Carbono | Manganês | Fósforo | Enxofre |
| Medido | 0,488 | 0,648 | 0,0068 | 0,0161 |
| Limites | 0,43-0,50 | 0,60-0,90 | 0,04 máx | 0,05 máx |

Fonte: Os autores (2019).

3 Resultados

A espectrometria óptica dos corpos do material AISI 1045 demonstrou os resultados apresentados na tabela 2, que contém os percentuais de elementos do material e os padrões aceitáveis para cada um deles, conforme estabelecido pela ASM.

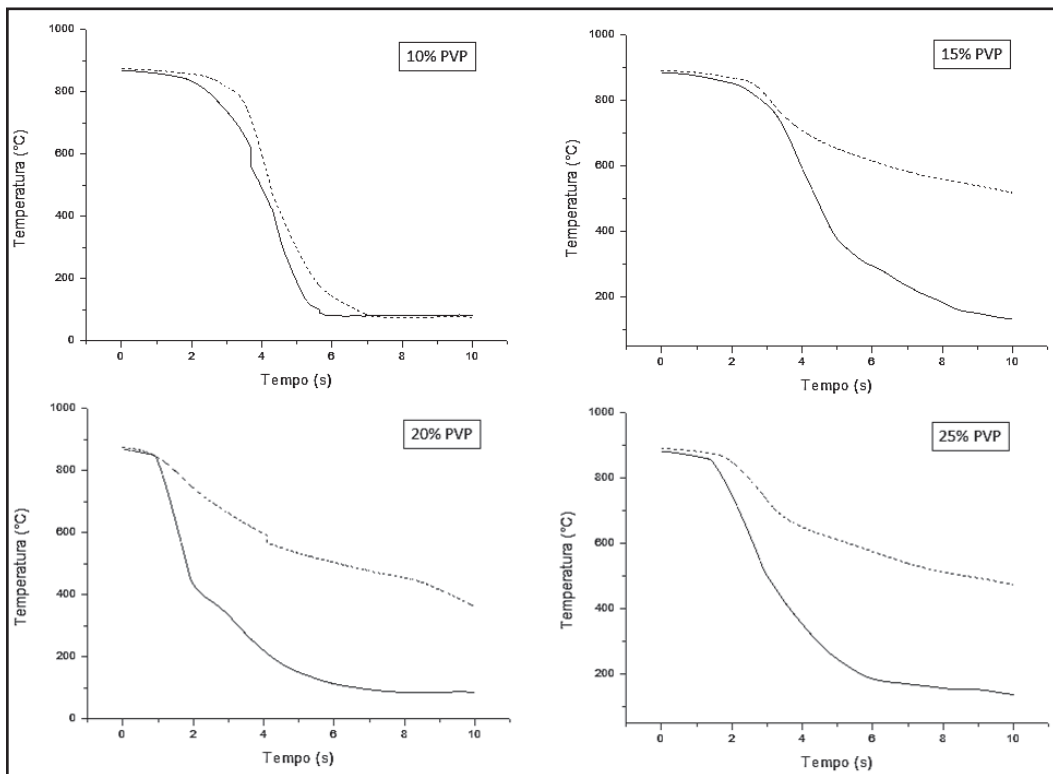
Os dados, relativos às temperaturas, durante o período em que os corpos eram arrefecidos, foram utilizados para a elaboração tanto de curvas de resfriamento quanto curvas das taxas de resfriamento. As curvas de resfriamento servem como indicador do tempo necessário para o desenvolvimento das três etapas da têmpera. Ademais, as curvas da parte interna da amostra evidenciam a discrepância entre o tempo para o resfriamento superficial do material e do seu núcleo, o qual é arrefecido exclusivamente por condução (ASM INTERNATIONAL, 1990). A figura 1 indica as curvas de variação das temperaturas do aço nas quatro concentrações do PVP selecionadas, as quais foram obtidas nos dez primeiros segundos do processo. Nessas curvas, as linhas cheias representam a temperatura superficial, e as linhas tracejadas, a temperatura do núcleo dos corpos.

Analisando as curvas, é possível constatar que na totalidade das situações às quais os corpos foram expostos, os três estágios de têmpera estão bem definidos na superfície, demonstrando uma rápida estabilização inicial, seguida de uma queda acentuada e, por fim, uma minimização da queda de temperatura. Esse desenvolvimento é coerente com as

curvas de têmpera e proporcionam visualmente o entendimento das minimizações das temperaturas desenvolvidas nas três fases de resfriamento, durante a têmpera. (MACKENZIE, 2014). Desse modo, percebe-se que no núcleo apenas a amostra de 10% de PVP apresentou curvas de resfriamento, características de têmpera; as amostras de 15, 20 e 25% de PVP desenvolveram um arrefecimento mais lento, sem uma queda acentuada na fase de ebulição (CHEN; ZHOU, 2002). Destarte, afirma-se que há acréscimo da dificuldade de troca térmica entre fluido e peça, consoante com o acréscimo da concentração, a qual torna o fluido mais viscoso e implementa a espessura da camada vaporizada, tornando-a mais estável (RAMESH; PRABHU, 2016).

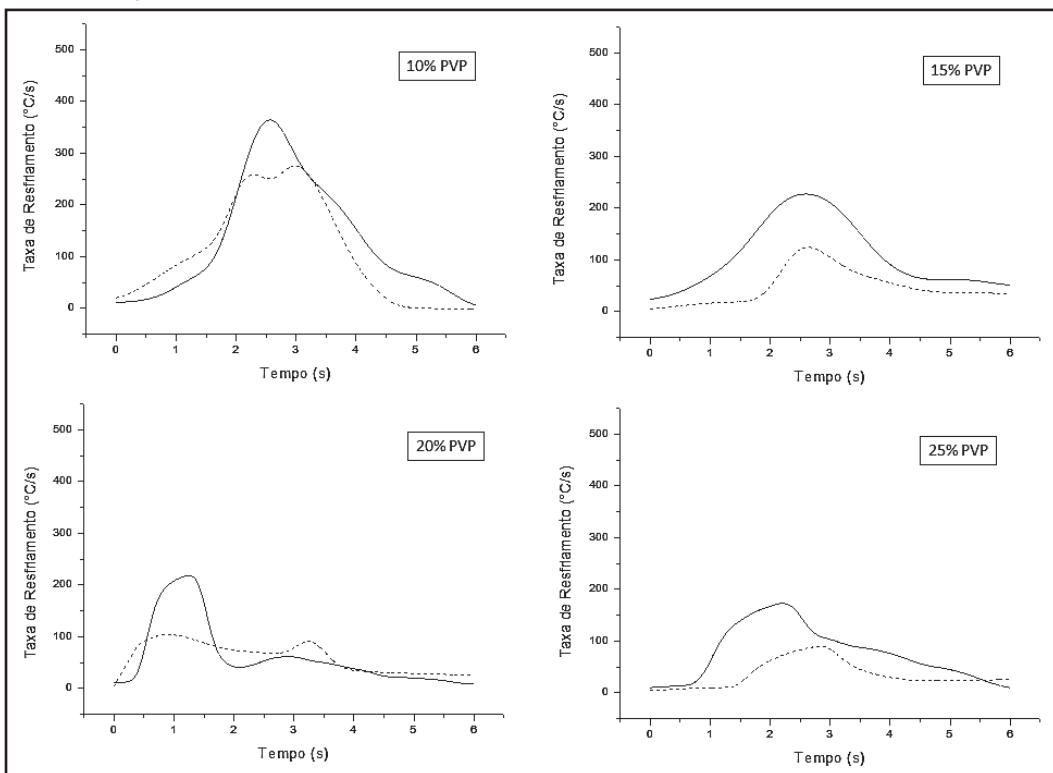
Em um próximo passo, foram verificadas as curvas relativas às intensidades de resfriamento nas amostras em uma unidade temporal. Essas taxas representam quantos graus de temperatura foram diminuídos do material no intervalo de um segundo. As taxas em cada fase da têmpera, iniciando com taxas mais baixas, durante a evaporação inicial. Então, há uma elevação acentuada das taxas, chegando no seu pico máximo durante a ebulição. Após, elas são novamente minimizadas, quando a convecção é instaurada. Enfim, ao atingir o equilíbrio térmico entre fluido e corpo, as taxas são nulas (IKKENE; KOUDIL; MOUZALI, 2014). A figura 2 representa essas curvas, nas diferentes situações de têmpera, nas quais as linhas cheias representam as taxas externas e as linhas tracejadas representam as taxas do núcleo das amostras.

Figura 1 - Curvas de resfriamento em 10, 15, 20 e 25% de PVP



Fonte: Os autores (2019).

Figura 2 - Curvas das taxas de arrefecimento em 10, 15, 20 e 25% de PVP



Fonte: Os autores (2019).

Os índices de arrefecimento dos corpos seguiram um comportamento coerente com as curvas de resfriamento. As curvas das superfícies demonstraram as três fases definidas, minimizando seus índices de variação térmica, conforme há incremento de soluto na solução polimérica (IKKENE; KOUDIL; MOUZALI, 2014). Ainda, assim como nas curvas

de resfriamento, é possível verificar a discrepância entre o comportamento das taxas nucleares e superficiais das amostras, em função dos mecanismos de transferência de calor das camadas do corpo. A tabela 3 apresenta as máximas taxas de arrefecimento superficiais e do centro das amostras, em cada concentração utilizada.

Tabela 3 - Taxas máximas de resfriamento internas e externas das amostras

| Concentração | Taxa Máxima de Resfriamento (°C/s) | |
|--------------|------------------------------------|--------|
| | Superfície | Centro |
| 10% | 363,92 | 291,26 |
| 15% | 227,03 | 124,20 |
| 20% | 218,10 | 103,62 |
| 25% | 172,82 | 89,56 |

Fonte: Os autores (2019).

A tabela 3 evidencia, conforme esperado, que as superfícies apresentam taxas máximas, consideravelmente mais elevadas que o núcleo. Essa discrepância é bem menor para sob concentração de 10%, na qual a diferença é de 19,96%. As diferenças são aumentadas consideravelmente, quando se tem a elevação para 15 e 20% que são: respectivamente, 45,29 e 52,49%. Por fim, com a concentração de 25% há uma ligeira queda na diferença entre a camada mais externa e o centro, resultando em 48,17%.

Confrontando com o trabalho de Ramesh e Prabhu (2016), o qual avaliou as taxas de arrefecimento das soluções de PAG, pode-se observar que as taxas de resfriamento superficiais máximas para 10 e 25%, foram de aproximadamente 200 e 140 °C/s. Dessa forma, fica evidenciada a maior capacidade refrigerante do PVP, que desenvolveu 363,92 e 172,82 °C/s, para as mesmas concentrações.

Ao utilizar soluções poliméricas de PVP, Ramesh e Prabhu (2014), obtiveram curvas de arrefecimento e taxas de arrefecimento bastante semelhantes às construídas no presente trabalho. No entanto, os valores encontrados foram severamente menores. Eles utilizaram proporções iguais 2 e 4% de PVP, essas que indicaram picos da variação térmica de 171 e 144 °C/s, respectivamente. Tal diferença é explicada pela não agitação no processo, o que intensifica a velocidade de arrefecimento do corpo, uma vez que auxilia na quebra da manta de vapor e intensifica a produção de bolhas, durante a ebulição. Ainda, Koudil, Ikkene e Mouzali (2014), encontraram índices mais próximos dos medidos no trabalho, embora as viscosidades do seu fluido fossem superiores, obteve aproximadamente 145 °C/s, para 15% PVP sem agitação e, ao empregar uma agitação de 2,618 m/s, a taxa máxima foi próxima a 180 °C/s.

4 Conclusões

A viscosidade cinemática das soluções de PVP, afetada pelo índice de concentração, reduz o potencial de transferência de energia térmica do meio refrigerante. A curva de temperaturas superficiais do material desenvolveu as três etapas do arrefecimento, no decorrer da têmpera de forma bem definida. O núcleo das amostras obteve um perfil térmico, diferente da superfície, resfriando lentamente e sem definição entre as etapas do processo.

Uma exceção a esse comportamento foi o fluido com 10% de PVP, que obteve um perfil semelhante à superfície do corpo. As taxas refrigerantes foram sendo minimizadas, segundo o acréscimo de polímero, sendo as maiores taxas encontradas em 10% e as menores em concentração de 25% de PVP. Há diferença entre as máximas taxas refrigerantes da superfície e centro das amostras. A menor diferença foi de 19,96, nas amostras arrefecidas em 10%, e a maior diferença medida foi de 52,49%, medida na amostra de 20% de PVP.

5 Referências

- ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook: heat treatment**. 10th ed. Russell Township: ASM International, 1990. v. 4
- CHEN, C. H.; ZHOU, J. E. The orthogonal-regression analysis on cooling rate of PVP quenchant. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 11, p. 527-529, 2002. DOI: 10.1361/105994902770343773.
- CIVERA, C. et al. Vegetable oils as quenchant for steels: residual stresses and dimensional changes. **Materials Performance and Characterization**, v. 3, p. 306-325, 2014. DOI: 10.1520/MPC20140039.

- FERNÁNDEZ, R. *et al.* A multi-scale analysis of the residual stresses developed in a single-phase alloy cylinder after quenching. **Materials and Design**, v. 137, p. 117-127, 2017. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.10.013.
- GRUM, J.; BOZIC, S. Influence of steel masses and quenchants on mechanical properties of steel. **International Journal of Materials and Product Technology**, v. 24, p. 224-240, 2005. DOI: 10.1504/IJMPT.2005.007951.
- HERNANDEZ, H. J. V.; MORALES, B. H. A novel probe design to study wetting front kinematics during forced convective quenching. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 33, p. 797-807, 2009.
- HILDER, N. A. Polymer quenchants: a review. **Heat Treatments Methods**, v. 13, p. 15-26, 1986.
- IKKENE, R.; KOUDIL, Z.; MOUZALI, M. Cooling characteristic of polymeric quenchant: calculation of HTC and prediction of microstructure and hardness. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 23, p. 3819-3830, 2014. DOI: 10.1007/s11665-014-1185-3.
- KOUDIL, Z.; IKKENE, R.; MOUZALI, M. Cooling capacity optimization: calculation of hardening power of aqueous solution based on poly (N-Vinyl-2-Pyrrolidone). **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 23, p. 551-559, 2014. DOI: 10.1007/s11665-013-0775-9.
- MACKENZIE, D. S. Selection of oil quenchants for heat treating processes. **International Heat Treatment and Surface Engineering**, v. 8, p. 8-14, 2014. DOI: 10.1179/1749514813Z.00000000089.
- MOYER, J. M.; ANSELL, G. S. The volume expansion accompanying the martensite transformation in iron-carbon alloys. **Metallurgical Transactions A**, v. 6, p. 1785-1791, 1974. DOI: 10.1007/BF02642308.
- NEVES, F. O. *et al.* Influence of heat treatment on residual stress in cold-forged parts. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2014, p 1-6, 2014. DOI: 10.1155/2014/658679.
- PATROCÍNIO, A. B. **Determinação de Velocidades Críticas de Têmpera em Aços pro Meio de Curvas de Resfriamento**. 1999. 136 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia do Materiais) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- RAMESH, G.; PRABHU, K. N. Effect of polymer concentration on wetting and cooling performance during immersion quenching. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 47, p. 859-881, 2016. DOI: 10.1007/s11663-015-0541-5.
- RAMESH, G.; PRABHU, N. K. Effect of thermal conductivity and viscosity on cooling performance of liquid quench media. **International Heat Treatment and Surface Engineering**, v. 8, p. 24-28, 2014. DOI: 10.1179/1749514813Z.00000000082.
- SEDIGHI, M.; MCMAHON, C. A. The influence of quechant agitation on the heat transfer coefficient and residual stress development in the quenching of steels. **Journal of Engineering Manufacture**, v. 214, p. 555-567, 2000. DOI: 10.1243/0954405001518251.
- TOTTEN, G. E; TENSI, H. M.; LAINER, K. Performance of vegetable oils as a cooling medium in comparison to a standard mineral oil. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 8, p. 409-416, 1999. DOI: 10.1361/105994999770346693.

