

A influência de diferentes taxas de resfriamento de polímero PAG nas distorções em peças de aço SAE 1050 no tratamento térmico de têmpera por indução

Manoel Leandro Ribeiro Correa ^{1*} 

Eduardo Luis Schneider ¹ 

Diego da Silva MartinTassoni ¹ 

Robison Mick de Oliveira ¹ 

Mauro das Neves Dias ¹ 

Cláudia Trindade Oliveira ² 

Resumo

As distorções dimensionais podem manifestar-se de forma expressiva em componentes de aço carbono, como o aço SAE 1050, após tratamentos térmicos de têmpera, devido à baixa temperabilidade dos mesmos. A taxa de resfriamento é um parâmetro do processo de têmpera que pode ser controlado para minimizar este inconveniente. Soluções contendo PAG (polialquilenoglicol) podem ser empregadas para resfriamento no processo de têmpera, permitindo controlar a severidade do resfriamento em função da quantidade de PAG na solução. O componente automotivo estudado, se localiza em uma das extremidades da junta homocinética, a qual é montada junto ao cubo de rodas do veículo. A região de montagem no cubo de rodas tem especificações dimensionais extremamente justas, o que torna ainda mais desafiador atender os requerimentos do projeto, quando é um aço ao carbono sem adição de elementos de liga. O presente estudo teve como objetivo avaliar as diferentes concentrações de PAG como meio de resfriamento, e a influência nas distorções dimensionais de uma ponta de eixo em aço SAE 1050 temperada por indução. Para isso, foram utilizadas concentrações de 5%, 10% e 15% de PAG, e avaliadas as distorções dimensionais por medições do diâmetro em três pontos da peça alinhados no sentido longitudinal após a têmpera por indução, bem como as medições da camada endurecida (dureza Vickers) e microestrutura.

Palavras-chave: Têmpera por indução; Taxa de resfriamento; Distorção; SAE 1050.

The influence of different PAG polymer cooling rates on distortions in SAE 1050 steel parts on induction heat treatment

Abstract

Dimensional distortions can manifest themselves significantly in carbon steel components, such as SAE 1050 steel, after quenching heat treatment, due to their low hardenability. The cooling rate is a quenching process parameter that can be controlled to minimize this inconvenience. Solutions containing PAG (polyalkylene glycol) can be used for cooling in the quenching process, allowing to control the severity of the cooling as a function of the amount of PAG in the solution. The studied automotive component is located at one end of the CV joint, which is mounted next to the vehicle's wheel hub. The assembly region on the wheel hub has extremely tight dimensional specifications, which makes it even more challenging to meet the design requirements, when it is a carbon steel without the addition of alloying elements. The present study target to evaluate the different concentrations of PAG as a cooling means, and the influence on the dimensional distortions of an induction-hardened SAE 1050 steel shaft end. For this, concentrations of 5%, 10% and 15% of PAG were used, and dimensional distortions were evaluated by measuring the diameter at three points of the piece aligned in the longitudinal direction after induction hardening, as well as measurements of the hardened case depth (Vickers hardness) and microstructure.

Keywords: Induction hardening; Cooling rate; Distortion; SAE 1050 steel.

¹Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

²Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Feevale, Novo Hamburgo, RS, Brasil.

*Autor correspondente: mleandrocorrea@yahoo.com.br



1 Introdução

A indústria metal mecânica, sobretudo a indústria automotiva, enfrenta sérios problemas devido às distorções e variações dimensionais durante a fabricação dos componentes, assim parâmetros relativos a tratamentos térmicos, soldagem e usinagem devem ser rigorosamente analisados e controlados com o intuito de evitar distorções indesejadas [1]. A distorção proveniente de tratamentos térmicos é um fenômeno complexo que envolve diversos fatores devido à temperatura e as transformações de fase que ocorrem durante o aquecimento e o resfriamento, o que inclui a ocorrência de tensões e deformações [2].

Dentre os processos que estão sujeitos a distorções, se encontram os tratamentos térmicos, que podem ser definidos como um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas [3]. Mudanças na forma e no tamanho da peça durante tratamentos térmicos podem ser atribuídas às tensões residuais que ultrapassam a tensão de escoamento do material, às tensões causadas pelos gradientes térmicos ou às mudanças de volume devido a transformações de fase [4].

Tratamentos térmicos como a têmpera permitem melhorar as propriedades de aços de baixo custo, permitindo seu uso em aplicações que exigem maior dureza e resistência mecânica proporcionadas pela estrutura martensítica formada no tratamento térmico [5]. Um destes aços carbono tratáveis termicamente é o aço SAE 1050. Este aço possui médio teor de carbono e permite alcançar propriedades mecânicas satisfatórias para ser empregado em elementos estruturais, porém como possui baixa temperabilidade, componentes fabricados com este material podem estar sujeitos a empenamentos, tensões internas e mudanças estruturais indesejadas, quando submetidos a elevadas taxas de resfriamento [6].

Comparado com o processo de têmpera tradicional, os tratamentos térmicos superficiais como a têmpera por indução possuem vantagens, como endurecer apenas regiões

críticas e poder evitar grandes distorções [3], podendo aumentar a dureza superficial e a resistência à flexão da peça mantendo um núcleo tenaz [7]. A profundidade da camada temperada pode variar de 0,25 a 1 mm para rolamentos e eixos de bombas que necessitam de resistência ao desgaste, enquanto é desejada na ordem de 1-2,5 mm para virabrequins e eixos de comando que também necessitam de maior resistência [8]. A têmpera por indução é mais flexível com relação ao controle dos parâmetros de processo, tais como potência, frequência, tempo de aquecimento e resfriamento, podendo proporcionar melhor qualidade à peça temperada e redução de distorções [9].

Diversos estudos têm sido realizados com a alteração de parâmetros do processo de têmpera por indução e verificação das distorções e tensões residuais em diversos aços carbono e aços liga. Dentre estes parâmetros alterados podem ser citados o tempo de aquecimento [10], a intensidade da corrente elétrica do indutor no aquecimento [7], a adição de um pré-aquecimento na peça antes do tratamento térmico [9] a taxa de resfriamento da peça por spray [11] e o meio de resfriamento [6].

Com relação ao meio de resfriamento, é um parâmetro determinante na têmpera dos aços, sendo mais comumente empregados água, salmoura e óleo mineral, porém os meios de resfriamento poliméricos apresentam vantagens sobre eles por serem biodegradáveis, não serem tóxicos ou inflamáveis e por proporcionarem um resfriamento uniforme com menor potencial para o surgimento de trincas e distorções [12]. Um exemplo dos meios de resfriamento poliméricos mais difundidos é o polialquileno glicol (PAG), um copolímero de óxido de etileno e óxido de propileno, que é empregado no arrefecimento de peças de aço carbono e aços liga nos mais diversos tratamentos térmicos e termoquímicos [12]. A Tabela 1 mostra uma relação entre os tratamentos, os materiais e os componentes onde pode ser empregado o PAG como meio de resfriamento.

Assim como outros polímeros, o PAG garante uma alta homogeneização na distribuição da fase martensita formada na têmpera e pequena queda no perfil de dureza [13], mas a concentração de polímero na solução é um parâmetro que pode ser alterado buscando uma maior ou menor retirada de

Tabela 1. Tratamentos, aços AISI/SAE e componentes onde o PAG é empregado

Tratamentos	Aços AISI/SAE			Componentes	
Têmpera por chama	103B3x	1070	5046	Barras	Eixos comando de válvulas
Cementação	1012	1141	5160H	Eixos	Roda dentada
Fornos tipo câmara	1020	4140	5135	Pinos	Bloco de matriz
Metalurgia do pó	1022	4150	52100	Parafusos	Blank de engrenagens
Fornos contínuos	1045	4320	8645	Rebites	Eixos de pequeno diâmetro
Carbonitreção	1046	4340	8650	Tubos	Uniões entalhadas
Têmpera direta de forjados	1048	4820	8655	Placas	Molas planas de suspensão
Têmpera por indução	1050	4870	8670	Engrenagens	Componentes da suspensão
Fornos de atm. neutra ou redutora	1065	41055	9620	Juntas forjadas	Rolamento de esfera
Leito fluidizado				Anéis forjados	Cilindros de alta pressão

Fonte: Canale et al. [12].

calor das peças. Uma baixa concentração de PAG na solução permite trocas térmicas comparáveis às obtidas com água e elevadíssimas concentrações de PAG dificultam a formação de martensita no tratamento [14].

No presente trabalho será verificada a influência da taxa de resfriamento na dureza e nas distorções ocasionadas após o tratamento de têmpera por indução, onde esta taxa será alterada a partir da concentração do polímero PAG no líquido de resfriamento. Serão submetidas à têmpera por indução peças de aço SAE 1050, um aço de custo competitivo industrialmente e cujo controle das distorções por meio da taxa de resfriamento não foi bem explorado em comparação com aços liga e outros aços carbono.

O componente tratado termicamente neste trabalho, é um item que compõe uma junta homocinética, a qual tem como função principal transmitir torque do motor para as rodas, mantendo a velocidade constante, independente da variação do ângulo entre eixos [15]. Este item tem tolerâncias de montagem extremamente justas, e qualquer deformação indesejada pode interferir na montagem da junta homocinética no veículo, o que conseqüentemente impacta na qualidade do produto.

2 Materiais e métodos

Foram preparadas 90 amostras de aço SAE 1050, cujas especificações técnicas são garantidas pelo controle de qualidade do fornecedor e cuja composição pode ser vista na Tabela 2. Foi realizada uma análise com espectrômetro de

emissão ótica Spectrolab a fim de verificar se esta composição condiz com a realidade do material.

Estas amostras foram submetidas à têmpera por indução sob as mesmas condições de ferramental (ducha e indutor), potência e tempo de aquecimento, diferenciando apenas o meio de resfriamento, na qual cada grupo de 30 amostras foi submetido a uma condição de resfriamento diferente.

A identificação ocorreu da seguinte forma: os corpos de prova com a identificação cinza, referem-se à concentração de 5%, os de identificação azul referem-se à concentração de 10% e os de identificação vermelha referem-se à concentração de 15% de PAG. Estas identificações são mostradas na Figura 1.

O resfriamento se deu com fluidos da empresa Quaker Houghton contendo 5%, 10% e 15% de PAG segundo informado pelo fabricante, na qual o resfriamento com fluido que contém 5% de PAG é o mais severo e o que contém 15% de PAG é mais brando, conforme pode ser visto nos valores listados na Tabela 3 e pela curva da taxa de resfriamento como mostra a Figura 2.

O volume do reservatório é de 4.000 litros, e o meio de resfriamento é realizado com agitação através de duchas com formato de placas e vazão de 120l/minutos.

Após a têmpera por indução foram realizadas metalografias sob ampliação de 100x e 500x. A preparação metalográfica foi realizada utilizando técnicas convencionais de lixamento com lixas de SiC na sequência de 240, 320, 400, 600 e 1200 mesh, e polimento com pasta de diamante de 3 µm e 1 µm.

Tabela 2. Composição química do aço SAE 1050

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
(%)	0,53	0,74	0,22	0,013	0,012	0,17	0,11

Fonte: Gerdau [16].

Tabela 3. Dados do fabricante Quaker Houghton a respeito do fluido de resfriamento

Concentração de PAG no fluido	Taxa máxima de resfriamento (°C/s)	Temperatura de início de ebulição (°C)	Temperatura de início de convecção (°C)	Taxa de resfriamento a 300 °C (°C/s)
5%	205,92	846,49	144,09	97,82
10%	198,04	847,75	160,61	87,61
15%	177,02	833,24	175,98	78,18

Fonte: Quaker Houghton [17].

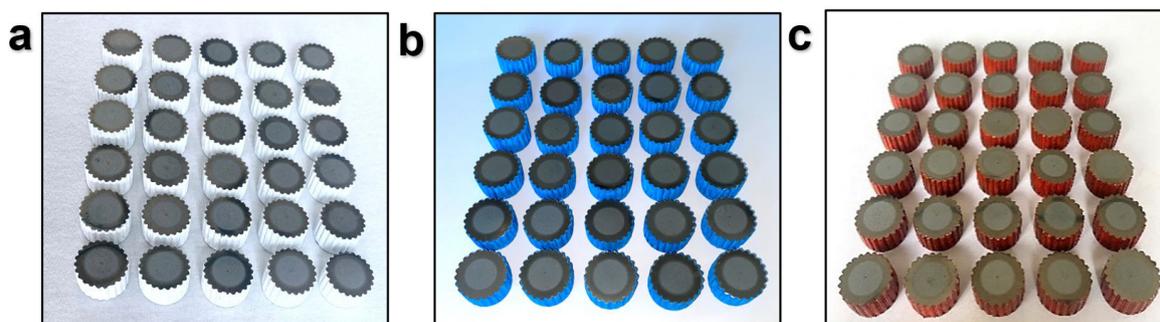


Figura 1. Amostras submetidas à têmpera por indução. Cinza (a), azul (b) e vermelha (c).

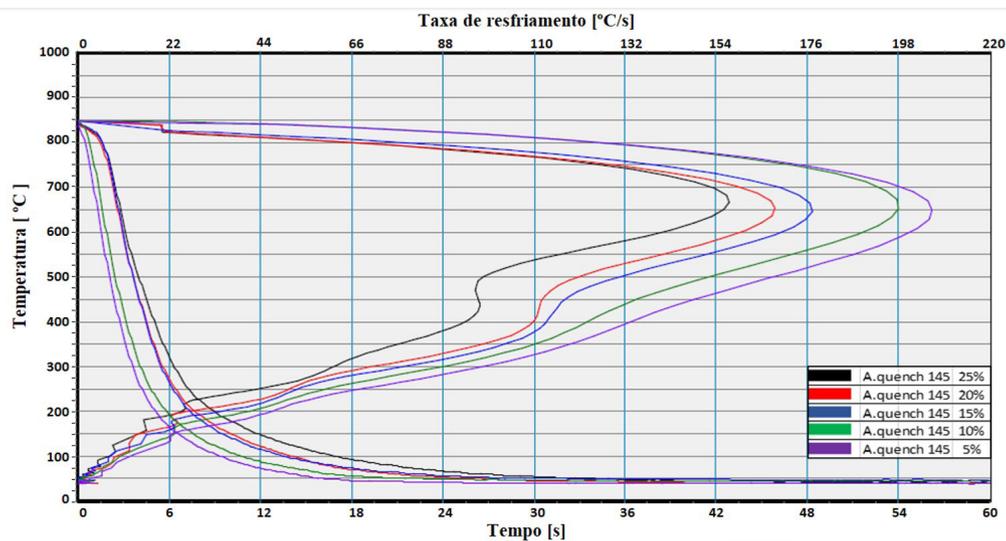


Figura 2. Taxa de resfriamento em função das concentrações de PAG. Fonte: Adaptado de Quacker Houghton [17].

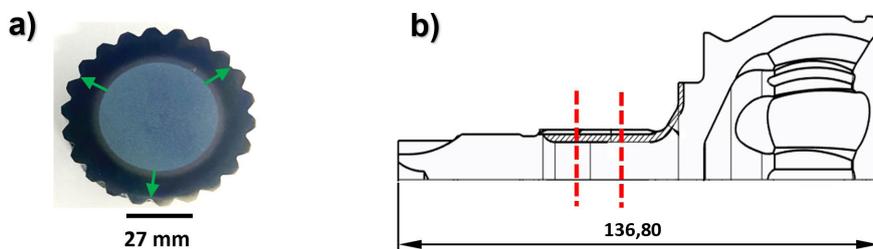


Figura 3. Corte seção transversal exibindo os três pontos de medição (a) e corte longitudinal (b).

As observações metalográficas por microscopia óptica foi realizada utilizando um microscópio de marca Olympus GX 51F, após ataque químico por imersão em solução aquosa de Nital na concentração de 3%. Também foram feitas medições de dureza Vickers nos três pontos da seção transversal da peça mostrados na Figura 3, a uma profundidade de 0,1 mm, profundidade igual à adotada em Yi et al. [10]. Este procedimento foi realizado através de um microdurômetro da marca Buehler modelo Micromet. Com este método foi possível calcular a dureza média a esta profundidade, além de ser realizada também uma medição para verificar a espessura da camada temperada que cumpre os requisitos de dureza estabelecidos em cada ponto, sendo usados nos resultados a média aritmética das três medições.

As distorções foram quantificadas por medições do diâmetro da peça em três pontos alinhados no sentido longitudinal, arbitrariamente chamadas de topo, meio e base, conforme mostra a Figura 4. As medições foram realizadas através de um micrômetro milesimal digital da marca Mitutoyo com tolerância de 25-50 mm. O diâmetro da peça nos pontos mencionados deve estar dentro da tolerância de projeto, que é entre 26,611 mm e 26,653 mm. Além disso, o topo e o meio não podem possuir diâmetro maior do que a base, assim se avaliou a severidade das distorções e verificou-se o quanto a mesma prejudica a qualidade do lote temperado em relação ao atendimento das especificações.

3 Resultados

A Tabela 4 exibe o resultado com o valor médio de três medições da composição química do aço SAE 1050 obtida pela espectrometria de emissão óptica, e confirma a composição dada pelo fornecedor no certificado de qualidade, por conter os mesmos elementos principais dentro da especificação e com aproximadamente as mesmas quantidades.

A análise metalográfica das amostras pode ser vista na Figura 5 para as amostras de identificação cinza (5% de PAG na solução), na Figura 6 para as amostras de identificação azul (10% de PAG em solução) e na Figura 7 para as amostras de identificação vermelha (15% de PAG na solução). Pelas micrografias é perceptível a formação de uma microestrutura martensítica com morfologia em ripas que é típica para esse teor de carbono dos SAE 1050, cujos detalhes microestruturais como as agulhas de martensita que são muito pequenas podem ser melhor visualizadas sob ampliação de 500x.

Na Figura 8 são mostrados os valores médios de dureza Vickers em uma camada de 0,1 mm de profundidade para cada uma das 30 amostras de aço SAE 1050 submetidas a cada um dos três tipos de resfriamento, na Figura 9 é mostrada a profundidade da camada temperada para cada uma das amostras temperadas pelos três meios de resfriamento em questão. Na Tabela 5 é mostrada a média aritmética da dureza da camada temperada e sua profundidade, bem como o seu desvio padrão.

Tabela 4. Composição química do aço SAE 1050 com base na espectrometria

	Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
Amostra 1	(%)	0,53	0,73	0,21	0,013	0,013	0,17	0,1
Amostra 2	(%)	0,52	0,75	0,2	0,015	0,016	0,16	0,12
Amostra 3	(%)	0,52	0,76	0,23	0,013	0,014	0,19	0,11
Desvio padrão		0,0058	0,0153	0,0153	0,0012	0,0015	0,0153	0,0100

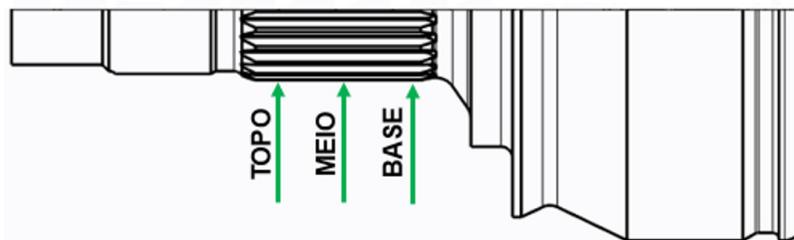


Figura 4. Corte seção longitudinal exibindo os pontos de topo, meio e base.

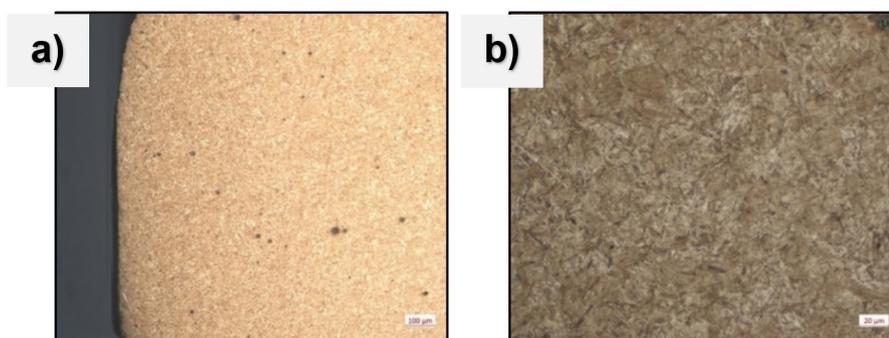


Figura 5. Metalografia das amostras de identificação cinza sob ampliação de 100x em a) e 500x em b).

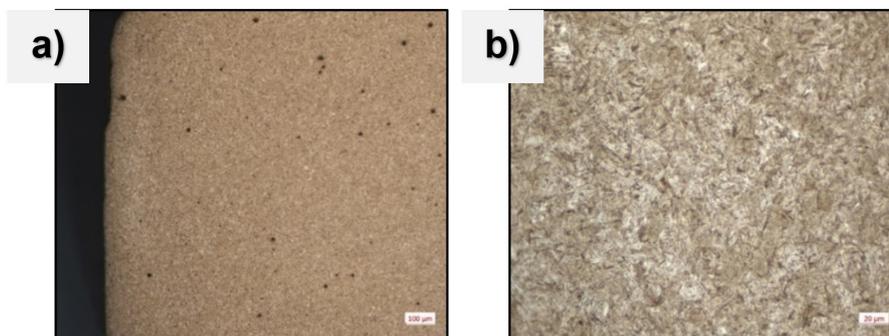


Figura 6. Metalografia das amostras de identificação azul sob ampliação de 100x em a) e 500x em b).

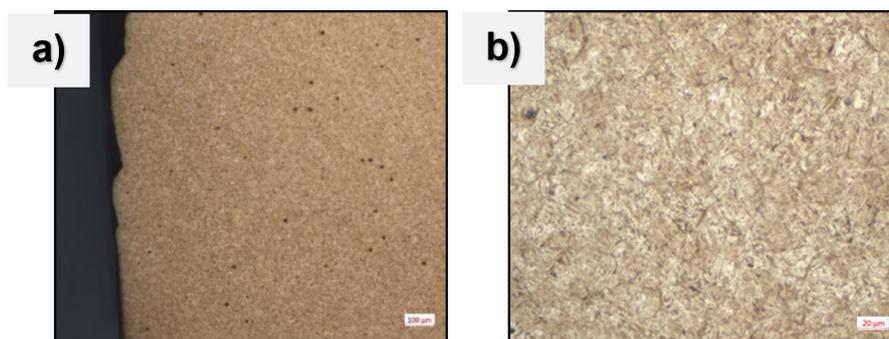


Figura 7. Metalografia das amostras de identificação vermelha sob ampliação de 100x em a) e 500x em b).

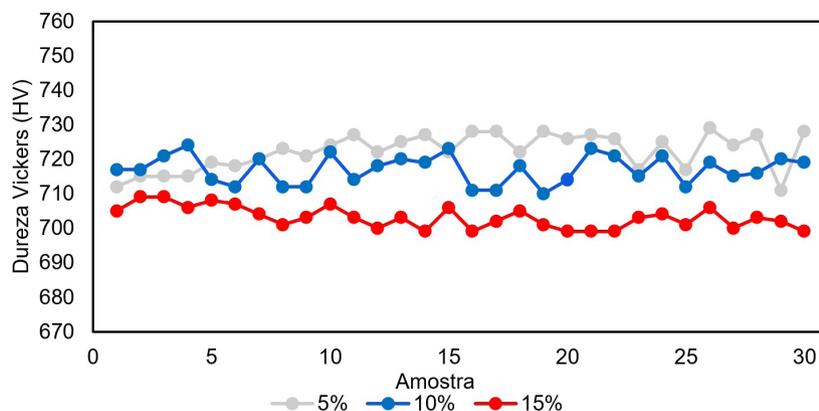


Figura 8. Dureza (HV) das amostras a uma profundidade de 0,1 mm.

Pode-se verificar que o resfriamento em solução de 10% de PAG produziu uma peça de dureza média muito próxima à dureza de uma peça resfriada em solução de 5% de PAG ou até levemente superior para muitas das amostras, mesmo sendo um meio de resfriamento mais brando, enquanto que o resfriamento em solução de 15% de PAG produziu peças de menor dureza por ser menos severo. A profundidade das camadas temperadas em solução de 5% e 10% de PAG é aproximadamente igual, enquanto que na solução de 15% é consideravelmente menor. Nas Figuras 10-15 são mostrados os diâmetros medidos no topo, no meio e na base das peças, correlacionando estes diâmetros com cada meio de resfriamento empregado e exibindo as tolerâncias dimensionais da peça antes e depois do ToTo. A Tabela 6 exibe os valores da média do diâmetro e o desvio padrão medidos no topo, no meio e na base das amostras resfriadas nas três condições trabalhadas.

O gráfico para o resfriamento em solução de 5% de PAG exibido na Figura 10 indica que houve uma distorção severa do meio da peça, onde por vezes a dimensão desta região ultrapassou o limite dimensional da peça em até 0,0225%. Assim como o ponto de meio, o ponto de topo possui dimensão superior à dimensão do ponto de base na grande maioria das amostras testadas chegando a uma diferença de 0,015% entre estes pontos, o que compromete a operação de montagem.

Da mesma forma que no resfriamento com solução de 5% de PAG, ao se empregar resfriamento com solução de 10% de PAG são perceptíveis distorções elevadas no ponto do meio, podendo estar inclusive acima da tolerância especificada para a peça também em 0,0225%. Pode ser observado, porém, que o emprego da solução de 10% de PAG diminuiu as distorções do ponto de topo, possuindo uma dimensão final menor do que a dimensão do ponto de base em 29 das 30 amostras, onde apresenta uma diferença de 0,011% em comparação com a base em apenas uma amostra.

No emprego do resfriamento em solução de 15% de PAG foi constatado que a peça está dentro dos limites de tolerância e a distorção dimensional foi menor do que nos meios de resfriamento anteriores tanto para o ponto de topo quanto para o ponto do meio, estando ambos abaixo da

dimensão do ponto de base, garantindo assim a funcionalidade da peça fabricada.

4 Conclusão

De acordo com os resultados obtidos, pode se concluir que o resfriamento em solução de 10% de PAG possui características muito próximas das obtidas em resfriamento de 5% de PAG, podendo se obter peças com uma camada temperada de dureza e profundidade cuja variação máxima em relação ao resfriamento em solução de 5% de PAG foi de 2,335% e 2,676%, respectivamente.

A respeito das distorções, foi observado que ocorreram em maior intensidade nos meios de resfriamento em soluções de 5% e 10% de PAG, onde a região do meio não só adquiriu diâmetro maior do que o topo e a base, como também chegou a ultrapassar o limite de tolerância dimensional deste produto em muitas amostras.

O resfriamento em solução de 15% de PAG produziu peças de dureza e profundidade da camada temperada ligeiramente inferiores às obtidas pelos resfriamentos mais severos, mas a severidade das distorções foi muito inferior, pois não só o diâmetro da peça se manteve nos níveis de tolerância especificados, como o diâmetro da base se manteve maior do que o diâmetro do meio e do topo, atendendo aos requisitos da peça.

A região na qual há montagem/encaixe no cubo de rodas tem especificações dimensionais extremamente justas, o que torna ainda mais desafiador atender os requisitos do projeto, visto que o material utilizado é um aço ao carbono sem liga, e por estas razões é preciso trabalhar para reduzir as distorções. Para a realização da têmpera por indução no componente estudado no presente trabalho, o resfriamento em solução de 15% de PAG se mostra mais efetivo, já que apesar de produzir uma camada temperada de menor dureza e menor profundidade, as distorções se mostraram menos severas, cumprindo os requisitos geométricos da peça e cujas dimensões estão dentro dos limites de tolerância dimensional. As propriedades e especificações metalúrgicas também foram atendidas em sua totalidade, conforme requerimentos do projeto.

Tabela 5. Média aritmética e desvio padrão da dureza e da profundidade da camada temperada para os três meios de resfriamento

Meio de resfriamento	Dureza Vickers média (HV)	Desvio padrão (HV)	Profundidade da camada média (mm)	Desvio padrão (mm)
5% de PAG	723,5	5,245	2,97	0,0298
10% de PAG	717,5	4,119	2,94	0,0210
15% de PAG	703	3,183	2,75	0,0195

Tabela 6. Média aritmética e desvio padrão da dimensão da peça no topo, no meio e na base para os três meios de resfriamento citados

Meio de resfriamento	Diâmetro médio no topo (mm)	Desvio padrão no topo (mm)	Diâmetro médio no meio (mm)	Desvio padrão no meio (mm)	Diâmetro médio na base (mm)	Desvio padrão na base (mm)
5% de PAG	26,64	0,0085	26,651	0,0073	26,638	0,008
10% de PAG	26,637	0,0075	26,646	0,0099	26,64	0,0076
15% de PAG	26,638	0,0052	26,642	0,0049	26,644	0,0049

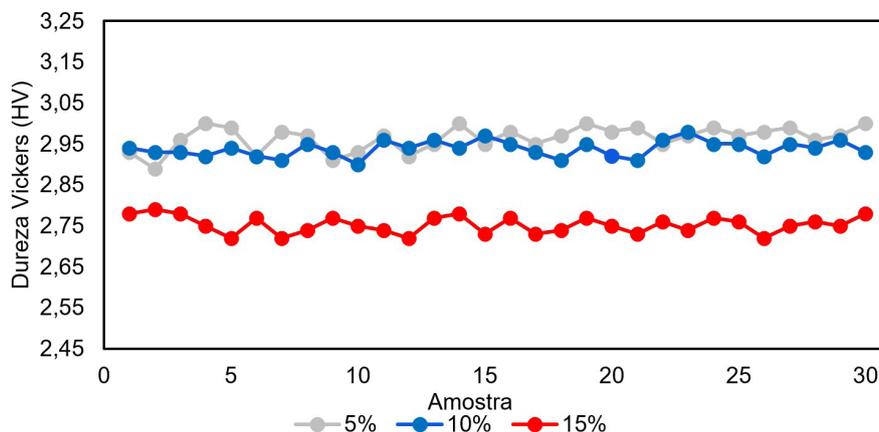


Figura 9. Profundidade da camada (mm) temperada das amostras.

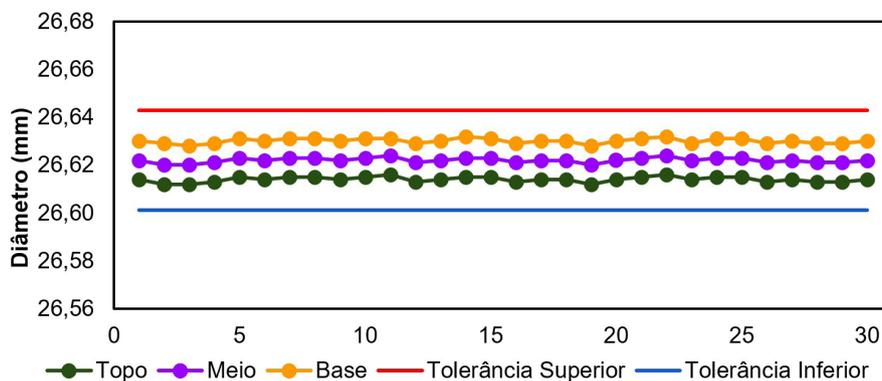


Figura 10. Diâmetro das amostras antes do tratamento térmico para o banho com 5% de PAG.

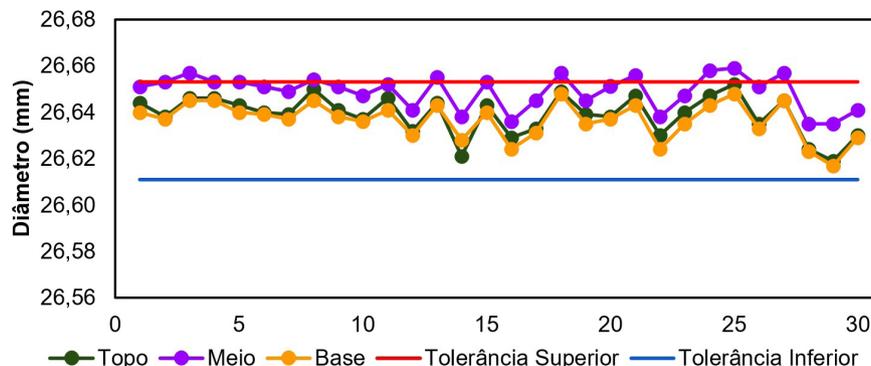


Figura 11. Distorções no diâmetro das amostras para o banho com 5% de PAG.

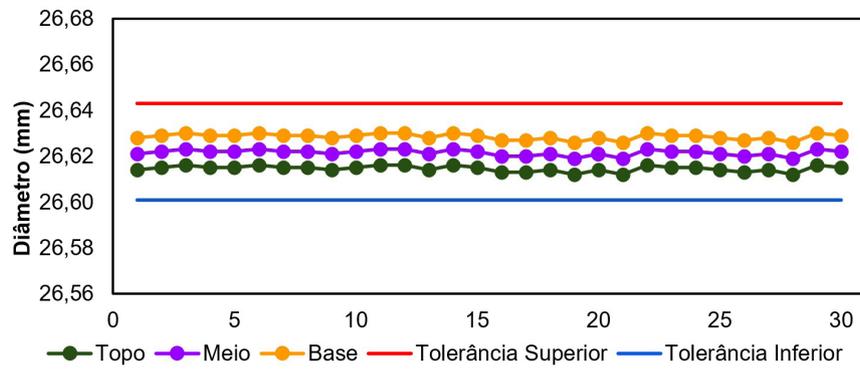


Figura 12. Diâmetro das amostras antes do tratamento térmico para o banho com 10% de PAG.

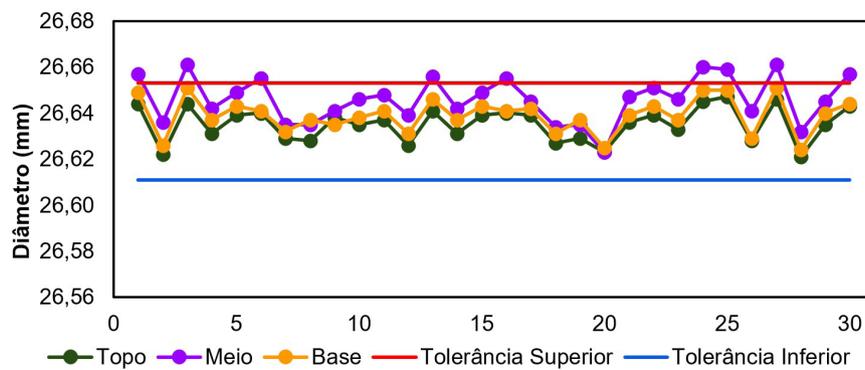


Figura 13. Distorções no diâmetro das amostras para o banho com 10% de PAG.

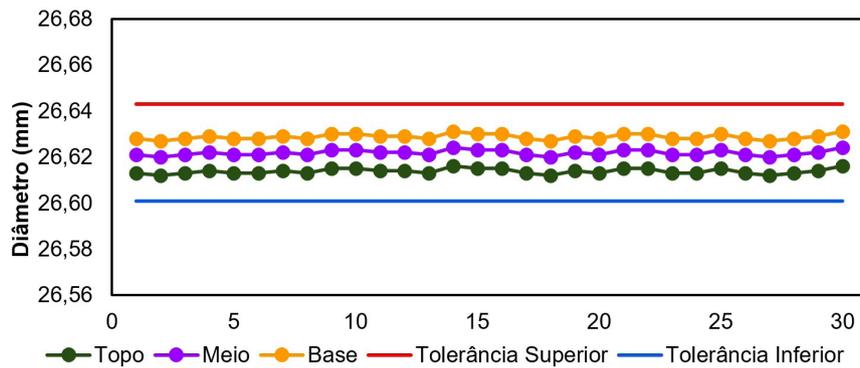


Figura 14. Diâmetro das amostras antes do tratamento térmico para o banho com 15% de PAG.

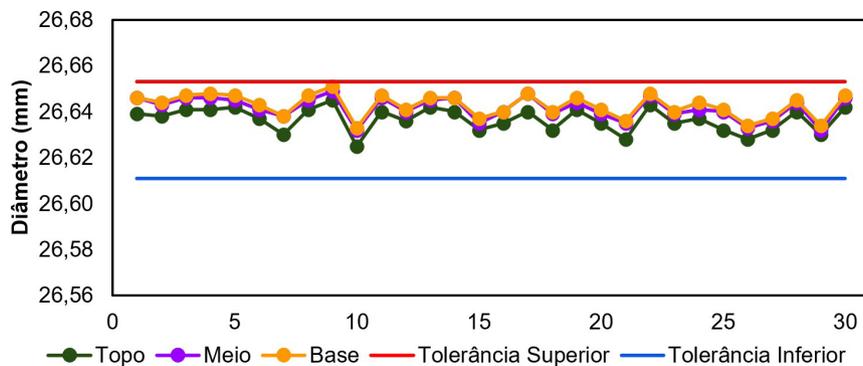


Figura 15. Distorções no diâmetro das amostras para o banho com 15% de PAG.

Referências

- 1 Grum J. A review of the influence of grinding conditions on resulting residual stresses after induction surface hardening and grinding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001;114(3):212-226.
- 2 Horino T, Ikuta F, Arimoto K, Jin C, Tamura S. Explanation on origin of distortion in induction hardened ring specimens by computer simulation. West Conshohocken: ASTM International; 2005.
- 3 Chiaverini V. Aços e ferros fundidos. 4. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais; 2008.
- 4 Totten GE. Steel heat treatment: metallurgy and technologies. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis; 2007.
- 5 Callister WD, Rethwisch DG. Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC; 2016.
- 6 Gamboni OC, Bosquetti P, Jardim JV, Ferreira BP. Análise microestrutural e de dureza do aço SAE 1050 após procedimento de têmpera utilizando diferentes fluidos de resfriamento. Anais do III Simpósio de Tecnologias da Fatec de Sertãozinho; 2020 Novembro 9-10; Sertãozinho, Brasil. Sertãozinho: SITEFA; 2020. p. 140-150.
- 7 Bossle VS, Villanova DL, Trevisan L, Villanova RL. Influência da intensidade de corrente elétrica do tratamento térmico de indução eletromagnética nas propriedades mecânicas do aço ABNT 1045. *Brazilian Journal of Development*. 2021;7(8):84801-84815.
- 8 Liscic B. Steel heat treatment. In: Totten GE, editor. *Steel heat treatment handbook*. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis; 2006. p. 280-285.
- 9 Li Z, Freborg A, Ferguson L. Effects of preheat on improving beneficial surface residual stress during induction hardening process. Anais do ASME 2016 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference. Volume 1: Processing; 2016 Junho/Julho 27-1; Blacksburg, Estados Unidos. Nova York: ASME; 2016. p. V001T02A040.
- 10 Yi J, Gharghoury M, Bocher P, Medraj M. Distortion and residual stress measurements of induction hardened AISI 4340 discs. *Materials Chemistry and Physics*. 2013;142(1):248-258.
- 11 Li Z, Ferguson BL, Nemkov V, Goldstein R, Jackwoski J, Filt G. Effect of quenching rate on distortion and residual stresses during induction hardening of a full-float truck axle shaft. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2014;23:4170-4180.
- 12 Canale LCF, Totten GE, Canale AC. Polímeros de têmpera à base de PAG. *Minerva*. 2006;3(2):209-214.
- 13 Vieira ER, Medeiros JLB, Biehl LV, Costa VM, Martins COD, Souza J. Analysis of the applicability of polymeric solutions as cooling fluid in the quenching of low-alloy steels. *Revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*. 2021;18:e2466.
- 14 Vieira ER, Biehl LV, Medeiros JLB, Silva AB, Silva MS. Efeitos da variação da concentração de solução polimérica aquosa a base de PVP na têmpera de aço AISI 4140. *Matéria*. 2019;24(3):e-12425.
- 15 GKN Automotive [página da internet]. [acesso em nov. 2022]. Disponível em: <https://www.gknautomotive.com>
- 16 Gerdau. Certificado de qualidade n° 125325, lote 1211272409. São Paulo: Gerdau; 2022.
- 17 Quacker Houghton. PAG: Aqua Quench 145. Conshohocken: Quacker Houghton.

Recebido em: 15 Dez. 2022

Accito em: 8 Mar. 2023