

EFEITO DA TÊMPERA SUPERFICIAL EM AÇO

Vitor M. Drumond (IC)¹, Reny A. Renzetti (PQ)¹.

¹Universidade Federal de Itajubá - Campus Theodomiro Carneiro Santiago .

Palavras-chave: Dureza, Resistência, Têmpera.

Introdução

A Fórmula SAE é uma competição internacional que avalia protótipos de veículos do tipo fórmula. Organizada pela Sociedade dos Engenheiros Automotivos (SAE *International*), a competição ocorre anualmente e desafia estudantes de engenharia a projetar, construir e correr um carro de fórmula. Esta competição tem como objetivo principal desenvolver habilidades práticas em engenharia, gestão de projetos e trabalho em equipe entre os estudantes. Além disso, promove inovação, criatividade e desenvolvimento na área automotiva, proporcionando oportunidades de interação com a indústria e mercado de trabalho no ramo automobilístico. Neste âmbito, é necessário que as equipes evoluam constantemente sua organização e seus projetos, para que a cada ano, os protótipos se tornem mais competitivos, agreguem habilidades mais refinadas nos projetistas e por consequência, gerem inovação. Portanto este trabalho visa, por meio de uma pesquisa sobre os processos de tratamento térmico no aço SAE 1045, otimizar a microestrutura e propriedades mecânicas do material, para que, desta forma, seja possível reduzir o diâmetro, e a massa total do eixo de transmissão.

Segundo Salamani (2008) transmissão é o conjunto responsável por transmitir a potência e torque gerados pelo motor para as rodas do veículo. O sistema é composto pelo pinhão, ligado diretamente ao eixo do câmbio do motor CB600F utilizado pela equipe Iron Racers. A rotação do pinhão é transferida por uma corrente, para a coroa, rotacionando o diferencial que está conectado aos semieixos, que por fim, transmitem a força para as rodas.

Quanto às forças atuantes nos semi-eixos, é possível afirmar, de acordo com Smith (1978), que este componente lida apenas com as cargas de torção provenientes do torque gerado pelo motor e atrito dos pneus com o solo. Visto que em um automóvel, o sistema de suspensão é responsável por absorver as irregularidades e forças que atuam nos eixos verticais e horizontais do veículo.

Segundo Norton (2013), o aço SAE 1045 é um aço de médio carbono, e, para temperá-lo, deve-se aquecer a peça à sua temperatura crítica de aproximadamente 760°C por tempo suficiente para que se estabilize nesta

temperatura e haja austenitização. Em seguida, a peça deve ser resfriada rapidamente em água ou óleo, gerando assim, uma microestrutura detentora de martensita, além da ferrita, perlita, cementita e outras estruturas já presentes antes do tratamento.

Ainda de acordo com Norton (2013), ao realizar a têmpera, há uma troca das propriedades mecânicas do material, de forma que, para que a resistência e a dureza aumentem, a ductilidade é reduzida, fragilizando a peça submetida ao tratamento. Com o objetivo de reduzir tensões residuais geradas e reduzir a fragilidade do material, a peça deve ser submetida ao revenimento. Este tratamento térmico consiste em aquecer novamente a peça entre 200°C e 700°C, abaixo de sua temperatura crítica, mantê-la nesta temperatura por um período determinado, depois, deixá-la esfriar lentamente. Este processo garante que parte da martensita formada retorne à forma de ferrita e cementita, restaurando também, parte da ductilidade, com uma pequena perda na resistência mecânica obtida na têmpera.

Para a execução do trabalho, foi realizada uma revisão que abrange o projeto de transmissão do protótipo, com destaque nos principais cálculos de esforços aplicados aos eixos, de modo a identificar o diâmetro ótimo a ser aplicado, e também suas massas, de acordo com o dimensionamento proposto para o carro atual.

Também foi realizado o tratamento térmico em diferentes condições para análise dos resultados e identificação do que seria o mais ideal para a aplicação desejada, visto que a geometria do eixo o torna propenso à fadiga.

Metodologia

Primeiramente, para obter um diâmetro inicial de referência, foram calculados os valores de torque aplicados aos semi-eixos, com base em dados fornecidos pela equipe Iron Racers e seguindo a metodologia de Birrento (2008), que associa os valores de potência, rotação e torque do motor em diferentes ramos, encontrados a partir das relações fornecidas pelo manual do motor em Moto (2008). Por fim foi obtido o momento torsor necessário para solucionar a equação de eixos de apresentada por Norton (2013):

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T}{\pi \cdot \tau_{adm}}} \quad (1)$$

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Sendo: d = diâmetro do eixo, T = torque aplicado no eixo, t_{adm} = tensão admissível do material
Após isso, corpos de prova de aço SAE 1045 cilíndricos com diâmetro de 28 mm e 150 mm de comprimento foram usinados.

Com esse material foi dado início ao processo de têmpera, no qual foram submetidos ao aquecimento em um forno indutivo (Figura 1) a uma temperatura de 900°C por 1h e 30 min, tempo que se mostrou suficiente para obtenção de bons resultados de têmpera de acordo com Trindade (2017). Após esse tempo, as peças foram temperadas por imersão em óleo, água, e salmoura, ambos à temperatura ambiente, Figura 2 .

Figura 1 – Forno indutivo utilizado para aquecimento.



Fonte: Autoria própria.

Figura 2 – Corpos de prova após a têmpera.



Fonte: Autoria própria.

Para a realização da análise das peças temperadas, foi feito o lixamento manual da superfície externa dos corpos de prova, com intuito de retirar a carepa proveniente da têmpera, e possibilitar o corte. As peças foram cortadas em sua sessão diametral, Figura 3, pelo método de eletroerosão à fio, que evita aquecimento excessivo que possa comprometer os efeitos da têmpera.

Posteriormente, as peças receberam um novo corte para obter as dimensões necessárias para que pudessem ser embutidas em material polimérico e levadas ao equipamento de teste de microdureza 402 MVD, com marcações realizadas a cada quatro voltas em seus fusos, no eixo X e Y, para coletar dados de dureza ao longo do comprimento na linha de diâmetro central, e ao longo do

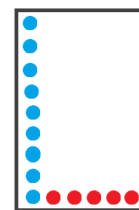
raio da peça, para auxiliar na identificação do método mais ideal de têmpera para a aplicação desejada.

Figura 3 – Desenho esquemático dos cortes.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4 - Desenho esquemático das marcações do ensaio de dureza.



Fonte: Autoria própria.

Para seguir um padrão em ambas as peças, foram realizadas nove marcações no eixo axial da peça, próximo ao centro de seu diâmetro (em azul), e outras 5 marcações avançando do centro para a extremidade do diâmetro (em vermelho), Figura 4, com objetivo de avaliar a profundidade da têmpera e a elevação da dureza do material.

Após isso, os corpos de ensaio foram lixados e polidos (Figura 5), para que possam ter sua microestrutura analisada em microscópio óptico, com objetivo de identificar as estruturas metálicas formadas, e relacioná-las com valores de resistência e dureza obtidos, também servindo como parâmetro para definição do método de têmpera que será utilizado.

Figura 5- peças polidas.



Fonte: Autoria própria.

O restante dos corpos de prova que não foram utilizado anteriormente foram cortados, para obter três discos provenientes de cada uma dos três tratamentos feitos, e após isso, submetidos ao processo de revenimento, a temperaturas de 400°C, 500°C e 600°C, por 60 minutos, Figura 6.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Figura 6 - Peças após o revenimento.



Fonte: Autoria própria.

Resultados e discussão

Primeiramente, o valor de referência para o diâmetro dos eixos sem tratamento foi de 22,3 mm para um torque calculado no ramo IV de 897 Nm e um valor de $410 \cdot 10^6$ Pa para a tensão admissível do material, logo, os valores de massa dos eixos de transmissão do protótipo obtidos através de relatório de projeto do SolidWorks foram de 1825 g para o eixo maior e 1138g para o eixo menor. Após isso, os principais resultados obtidos neste trabalho foram os valores de dureza Vickers gerados, tabelas 1, 2 e 3, pelo ensaio nas peças temperadas, com esse ensaio, os seguintes valores foram obtidos:

Tabela 1 – Dados do ensaio de dureza da têmpera em óleo.

Pontos longitudinais	Dureza [HV]	Pontos radiais	Dureza [HV]
1°	263,6	1°	224,1
2°	253,2	2°	231,7
3°	279,8	3°	228,7
4°	270,0	4°	240,7
5°	290,1	5°	248,5
6°	248,5		
7°	251,8		
8°	255,8		
9°	253,9		

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Dados do ensaio de dureza da têmpera em água.

Pontos longitudinais	Dureza [HV]	Pontos radiais	Dureza [HV]
1°	294,7	1°	282,5
2°	233,9	2°	283,5
3°	346,0	3°	283,2
4°	292,6	4°	306,2
5°	303,8	5°	371,6
6°	272,6		
7°	287,0		
8°	367,8		
9°	299,9		

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 – Dados do ensaio de dureza da têmpera em salmoura.

Pontos longitudinais	Dureza [HV]	Pontos radiais	Dureza [HV]
1°	288,2	1°	252,4
2°	278,1	2°	257,9
3°	286,2	3°	261,7
4°	268,9	4°	269,3
5°	279,2	5°	291,8
6°	279,7		
7°	279,0		
8°	300,0		
9°	277,6		

Fonte: Autoria própria.

Os dados obtidos sugerem que a têmpera não foi efetiva ao longo do comprimento do corpo de prova, o que era desejado, visto que o aumento de resistência esperado é no eixo radial, que eleva sua capacidade de suportar o torque proveniente do motor que atua neste sentido. De acordo com Silva (2015), a têmpera do aço SAE 1040 em óleo e salmoura gerou cementita em formato de grãos agulhares, porém a salmoura elevou a dureza do metal de forma abrupta, enquanto a têmpera em óleo proporcionou uma microestrutura com maiores grãos de ferrita, elevando a tenacidade do material, apesar de obter menor dureza.

Para o uso que será dado ao aço 1045 utilizado nesta pesquisa, e tomando como base o estudo de Silva (2015), a salmoura já se mostra inviável, devido a grande elevação na dureza do material, o que pode acarretar em futuras fissuras na região das estrias dos semi eixos do protótipo de Fórmula SAE. Portanto, o foco se volta em comparar a microdureza e valores de resistência do material temperado em água e óleo.

Além disso, foi possível perceber que a peça temperada em água foi a que mais teve elevação em sua dureza superficial, o que prejudica o uso deste método para a confecção do eixo, assim como o uso da salmoura. Assim, é possível definir a têmpera em óleo como a mais indicada, por ser a menos agressiva, e portanto a que gera menores tensões residuais na geometria que tende a acumular tensões presentes na estria dos eixos.

Conclusões

Com os resultados obtidos, é possível concluir inicialmente que a têmpera em óleo será a mais indicada para a produção dos semieixos, já que também atua superficialmente do sentido radial da peça.

Mas é importante destacar a necessidade de realizar ensaios de tração seguindo a NBR 6892 (2002) em corpos de prova temperados para avaliação do aumento de sua

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

resistência em termos de tensão em relação à deformação, ensaio que não foi realizado devido à dificuldade de obtenção dos corpos de prova em conformidade com a norma NBR 6892. Estes ensaios devem ser feitos para que seja possível calcular de fato o novo diâmetro equivalente para os eixos e refazer o projeto com auxílio da modelagem 3D, e avaliar a massa final dos novos componentes projetados.

Agradecimentos

Agradeço à Universidade Federal de Itajubá pela estrutura física e materiais ofertados, e ao CNPq pelo incentivo financeiro para a realização do estudo.

Referências

- BIRRENTO, Ricardo J. P. Projeto de um sistema de transmissão de um veículo de competição Formula Student. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008.
- MOTO, Honda da Amazônia LTDA. Manual de Serviço CB600F Hornet. 2008.
- NBR 6892: Materiais metálicos – Ensaio de tração a temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2002
- NORTON, Robert L. Projeto de máquinas: uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre : Bookman, 2013.
- SAE, International. (2024). Fórmula SAE.
- SALAMANI, João C. Apostila de Transmissão 2. Volume 2. Centro Universitário da FEI, 2008.
- SILVA, Amanda C. M et al. Estudo da têmpera do aço SAE 1040. Rio de Janeiro. Agosto, 2015.
- SMITH, Carroll. Tune to win: The art and science of a race car development and tuning. Fallbrook, CA: Aero publishers, 1978.
- TRINDADE, Denisson R. et al. Estudo e avaliação do tempo de permanência a temperatura no tratamento térmico de têmpera do aço SAE 1045. Revista processos químicos. Anápolis, GO. 2017.