

ANÁLISE TÉRMICA DA NITRETAÇÃO EM UM DISCO DE FREIO BAJA

Ricardo Diogenes Melo Cavalcante

Resumo: O dimensionamento de peças para o mecanismo do freio é fundamental para a segurança de operadores de veículos, abrangendo aspectos ínfimos para obter maior rendimento, devendo brevemente constar necessidades do sistema e definir suas metas. O disco de freio é projetado para suportar esforços que geram tanto pendências estruturais, quanto térmicas, analisando a meta de conversão de energias mecânicas em calor, havendo assim variação de sua temperatura. O presente trabalho consta uma análise térmica de um disco de freio de um veículo baja, utilizando um ensaio de desempenho de frenagem para avaliação de propriedades alteradas a partir da técnica de nitretação por plasma. Com esses dados sendo usados como base para a simulação de resfriamento do disco, com as condições de contorno elaboradas para um projeto de disco de freio e obtendo o gradiente da temperatura do ar no ponto crítico da aplicação de calor do freio pela simulação, foi constatado que para a geometria do disco utilizada o tratamento de nitretação plasma apresenta gradientes térmicos semelhantes aos discos convencionais, atuando numa faixa de temperatura mais elevada, uma vez que este tratamento altera o calor específico do material de forma considerável.

Palavras-chave: Simulação térmica; Disco de freio; Nitretação a plasma; Baja.

1. INTRODUÇÃO

A humanidade sempre buscou mecanismos para extrapolar suas capacidades físicas, como a necessidade de transportar em grandes distâncias, que resultou na criação da roda, até os foguetes, definindo o uso de veículos. Veículos são elaborados para percorrer um trajeto, dando início a uma problemática: parar o veículo, visto que ele é projetado para exceder a capacidade física humana, atribuindo o controle para outro mecanismo, o freio.

O freio é um mecanismo acoplado a outro, que ao ser acionado, deve parar o sistema. Em freios a disco a problemática está no próprio disco que converte a energia cinética e potencial do veículo em calor a partir da fricção [1], assim devendo suportar o atrito e o calor gerado.

Podemos dizer, portanto, que o grande desafio no projeto de freio a disco é balancear os fatores que envolvem a resistência a tensão e a geração de calor da peça, para maximizar a extração de energia, aliado ao desempenho estrutural.

Análises estruturais para dimensionamento do disco de freio indicam os requisitos para suportar as cargas aplicadas ao próprio, definindo material, geometria e, para melhor performance do sistema em termos de desgaste, aplicação de tratamentos [2], contribuindo para o aumento da vida útil do próprio componente, como também para menores desgastes gerados pela interação com os demais. Principalmente no uso de tratamentos termoquímicos, que alteram as propriedades mecânicas e térmicas do material, afetando a eficiência da geração de calor e em seu resfriamento, a troca de calor entre o disco e o ar.

Análise térmicas são fundamentais para avaliações de tempo de vida útil, entre outras capacidades do sistema, visto que a interação do disco de freio com o componente que age como acionador da fricção, as pastilhas da pinça de freio, gera calor suficiente para que tenham suas propriedades alteradas ao longo da operação de frenagem, pela variação da temperatura, criando uma zona de temperatura para o trabalho destes componentes. Principalmente pelas pastilhas de freio, que bruscamente se tornam maleáveis e desgastam facilmente em altas temperaturas, e o fluido de freio, pelo seu ponto de ebulição.

O objetivo do trabalho é realizar uma análise da interação da temperatura do disco com o resfriamento livre, baseada nas propriedades do disco que sofreu um tratamento térmico de nitretação a plasma, que é um tratamento termoquímico que insere átomos de nitrogênio na matriz de metais, por processos de reação, deposição e difusão de compostos, oriundos da interação dos íons do plasma com os átomos do metal, seguindo metas de maior rendimento térmico, desde a convergência de energias, até o resfriamento, para conseguir definir os parâmetros de fabricação e tratamento durante o dimensionamento do projeto do disco de freio.

Utilizando software de engenharia assistida por computador (CAE), para definir a temperatura crítica que o disco nitretado apresenta ao ser dimensionada para um veículo baja, é possível definir as propriedades alteradas do material por este processo e utiliza-las em concordância na análise de fluido que é o resfriamento pelo ar [3] para projetar o disco que atenda os fatores, normas e metas do dimensionamento do sistema de freio, adquirindo os dados utilizados nesta simulação a partir de ensaios de desempenho em campo, realizados para medição de propriedades térmicas que são alteradas pelo tratamento de nitretação da peça, comparadas aos discos padrão.

2. DESENVOLVIMENTO

O projeto do disco de freio analisado foi o submetido à condição de tratamento IV [2], por apresentar a melhor performance nas devidas condições de trabalho e são o foco do dimensionamento do disco. O modelo é utilizado para aquisição de dados necessários para a análise, visto que as propriedades térmicas de um aço SAE 1045 nitretado a plasma a 673,15 K por 4 horas não são tabelados. Análise consiste no disco em sua temperatura de trabalho máxima, enquanto sofre o resfriamento a partir do ar em velocidade máxima do veículo, constando a interação do fluido com o objeto de dimensionamento, o disco de freio.

Tabela 1 Condições do tratamento IV (Quadro 1) [2]

Temperatura (K)	673,15
Duração (h)	4
Pressão(mBar)	2
Corrente continua pulsada(ms)	50 desligada e 150 ligada

2.1. Aquisição de dados: calor específico

A análise demanda o calor específico do material do disco para parametrizar a variação de calor no sistema. O calor específico é a quantidade de calor necessária para alterar em 1 K a temperatura do material, desde a fricção das pastilhas ao resfriamento ao ar, constando todas as suas propriedades a temperatura ambiente. Há a necessidade de uma avaliação de suas capacidades térmicas, uma vez que o calor específico foi alterado com a aplicação de um tratamento térmico.

Esse dado é adquirido pela realização de um teste comparativo, sob as mesmas condições, entre o disco de freio tratado com o disco não tratado, para averiguar a diferença entre ambos, estando o disco nitretado acoplado à roda dianteira esquerda e o disco padrão fixado junto à roda dianteira direita.

O teste avaliou a variação de temperatura ao longo de várias frenagens consecutivas [4], sendo adaptado para um veículo baja, diminuindo o número de frenagens para 10 em decorrência de sua massa e tamanho serem inferiores que os demais modelos veiculares. Em cada ensaio o veículo deve alcançar 80% de sua velocidade máxima, para então acionar o freio e diminuir a velocidade até estabelecer 40% da velocidade máxima do veículo baja, acelerando novamente, repetindo o processo 10 vezes, mantendo a desaceleração constante em todas as frenagens, monitorando-se a temperatura apresentada ao longo de cada teste a partir de dois sensores que utilizam métodos diferentes para aquisição de dados, para maior precisão e exatidão, além de terem uma zona de trabalho elevada, posicionados como mostrado na figura 1. No pedal de freio foi aplicado um fim de curso para manter a desaceleração constante de 3 m/s², com velocidade máxima de 14,44 m/s, um termopar tipo-K foi inserido na pastilha da pinça de freio para monitorar a temperatura do disco, o sensor de temperatura MLX90614 obtém a temperatura do disco ao ser acoplado ao montante do veículo, com seu infravermelho apontado ao disco, sendo conectados ao arduino para transmissão dos dados.



Figura 1 - Localização do sensor de temperatura e sua fixação (autoria própria).

As variações na temperatura são apresentadas na figura 2:

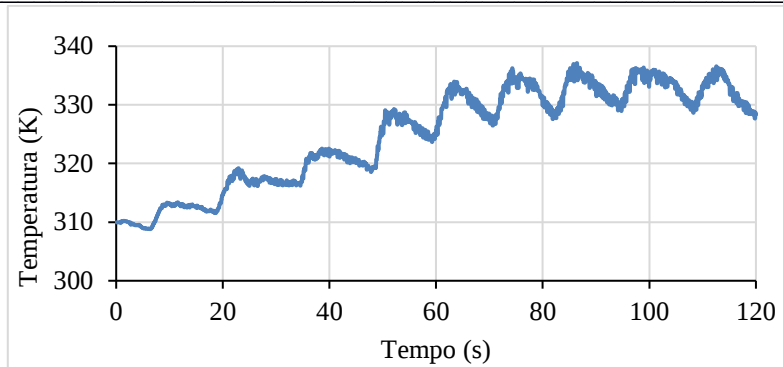


Figura 2.1 - Efeito na temperatura do disco padrão em frenagens consecutivas.

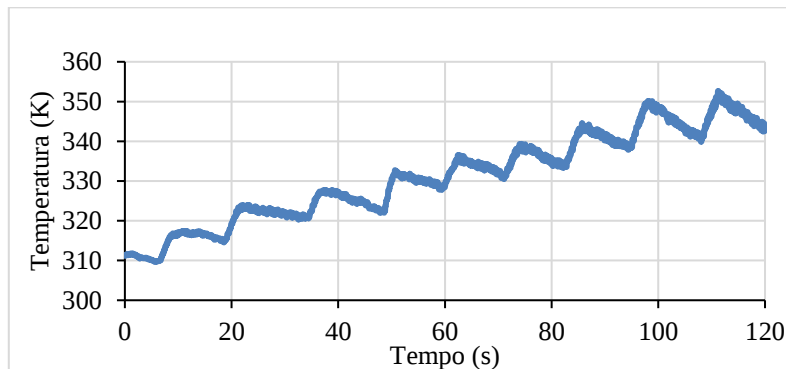


Figura 2.2 - Efeito na temperatura do disco nitretado a plasma em frenagens consecutivas.

As medidas demonstram que o disco nitretado atinge temperaturas mais elevadas, havendo pouca diferença no resfriamento entre os discos, e uma vez que o fluxo do ar aplicado aos discos são iguais, pelo teste ocorrer simultaneamente, é constatado que a taxa de resfriamento do disco nitretado apesar de ser maior que aquela apresentada pelo disco padrão, com uma média de diminuição de temperatura de 5,63 K, comparada a uma média 5,5 K para o disco padrão, demonstrando que apesar de se obter uma taxa de resfriamento entre frenagens mais linear, o disco tratado atua num regime de maiores temperaturas.

Para definir o calor específico (c_n) do disco nitretado utilizamos os dados do padrão. Conhecendo o calor específico do material do disco padrão (c_p), aço SAE 1045, e com a média da temperatura variada (ΔT) entre as 10 frenagens consecutivas e a massa do disco de freio padrão (m_p), estabelecemos o calor gerado (U_p) pelo sistema de freio [5], apresentada a seguir, para um material que apresente pressão e volume constantes, assim desprezando o desgaste do disco nessa avaliação.

$$U_p = c_p m_p \Delta T \quad (1)$$

O aço SAE 1045 tem um calor específico de 486 J/(kg.K), valor tabelado pelo fornecedor, disco apresenta uma massa de 0,322 kg e a média da variação das temperaturas é 5,98 K, obtendo um calor médio de 958,316 J. Como o sistema é igual perante os dois discos e foram testados em conjunto, essa energia aplicada ao disco padrão também foi considerada para o disco nitretado na outra roda e aplicando a equação para os valores do disco nitretado, encontramos seu calor específico que será utilizado na análise:

$$c_n = \frac{U_p}{m_p \Delta T} \quad (2)$$

Sendo a massa do disco nitretado igual a 0,322 kg, variação de temperatura média de 6,46 K, temos que o calor específico do disco nitretado a plasma é 460,29 J/(kg.K), sendo menor que o do disco padrão, o que implicará que para a mesma energia aplicada, haverá uma variação maior de temperatura, como constatado no figura 2.

2.2. Aquisição de dados: temperatura de trabalho

Como o sistema de freio age contra toda a cinética do veículo baixa e a análise serve como dimensionamento para o projeto do disco de freio, é constatado que toda energia cinética e potencial do veículo deve ser transformada em energia térmica pelo sistema do freio em um único disco, como condição de contorno para assegurar a frenagem, em que uma única roda com disco em funcionamento deve ser suficiente para a frenagem do veículo [1], sendo essa a energia de frenagem. A partir dessa energia há variação de temperatura do disco, análise se baseia na temperatura máxima para o disco, então a temperatura máxima possível será utilizada nesta análise, para aplicar

a variável como condição de contorno na análise, constada na equação a seguir [1]:

$$E = Wh + \left(\frac{km}{2}\right)(V_2^2 - V_1^2) \quad (3)$$

Aplicando a equação (3) na (1), substituindo o calor gerado como a necessidade de o freio gerar este calor (E), obtemos a seguinte temperatura máxima para o disco nitretado sem resfriamento, para o projeto do veículo em que foi testado com uma massa de 158,65 Kg (m) e velocidade máxima de 14,44 m/s (V_2) e velocidade final de 0 m/s (V_1), uma constante de correção para massa rotativa (k) de 2, por considerar o caso que resulte na maior variação de calor, e com a condição de contorno de uma pista reta, sem variações angulares, aplicando a ausência de uma energia potencial gravitacional(Wh), teremos a equação (4).

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{km}{2}\right)V_2^2}{c_n m_p} \quad (4)$$

Tendo uma variação de temperatura de 223,48 K, a partir de uma temperatura ambiente de 303 K, a temperatura de trabalho do disco de freio será de 526,48 K.

2.3. Aquisição de dados: condutividade térmica

A condutividade térmica do disco nitretado a plasma é a mesma do padrão, a diferença da taxa de resfriamento é ínfima, considerando a margem de erro do teste, e sabendo que a maior parte da adesão de compostos de nitrogênio(nitretos) está na superfície limpa de adesão, sendo consumida nas primeiras frenagens do veículo deixando a condutividade térmica em aproximação com a padrão e tendo maior parte do disco nitretado em seu núcleo com a mesma referente ao padrão. Isso se deve ao item abordado, o disco de freio, ser referente a combinação e antagonização de dois mecanismos, o projeto deve atribuir propriedades e avaliar suas variáveis de forma conservadora, atribuindo suas condições para obter resultados mais influentes e constates para o sistema de freio, principal mecanismos de segurança do veículo [1].

2.4. Simulação térmica

A partir do software Ansys Student o modelo do desenho assistido por computador (CAD) do disco é gerado atribuindo uma simulação no fluent, uma plataforma de simulação para fluidos com pré-processamento, aplicando os parâmetros e condições de contorno ao programa a partir da definição do volume de controle, avaliando a interação entre o disco e o ar para seu resfriamento. O programa foi escolhido pela acessibilidade e ter os componentes de processamento necessários, como CAD e o fluent.

2.4.1. Modelo

A geometria do disco foi desenhada no próprio software Ansys que, além de expressar o disco para a análise, é necessário constar o volume de controle, caracterizando a entrada e saída do fluido. Uma vez que o sistema é aberto e está em contato com a atmosfera e não há barreiras que impeçam o contato do ar com o disco de freio, o volume de controle se resume a um retângulo que enclausura a geometria do disco de freio.

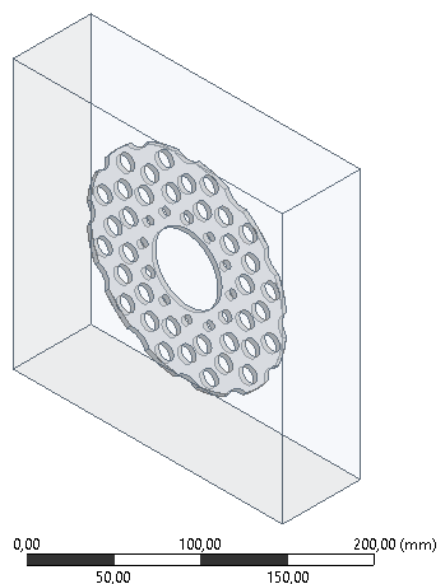


Figura 3 - Volume de controle retangular com a geometria do disco posicionado internamente.

A malha do disco foi definida em qualidade a partir do sistema jacobiano, pela geometria simples apresentada pelo disco e volume de controle o jacobiano se torna uma métrica mais cabível, com uma meta de ser menor que dois, pela utilização de malha tetraédrica, para constar a melhor espessura de interpolação. Atribuição do tamanho da malha é definido por uma avaliação de convergência, realizando a análise com uma malha rústica e realizando novamente diversas vezes com malhas cada vez mais refinadas até a convergência dos resultados, denotada por uma variável baseada em número de nós (n), presente na equação 5, interligada com o resultado da simulação, precisa ser plotado e constado que para o número de nós tendendo ao infinito, o resultado converge para zero.

$$\kappa_i = \frac{1}{n} \quad (5)$$

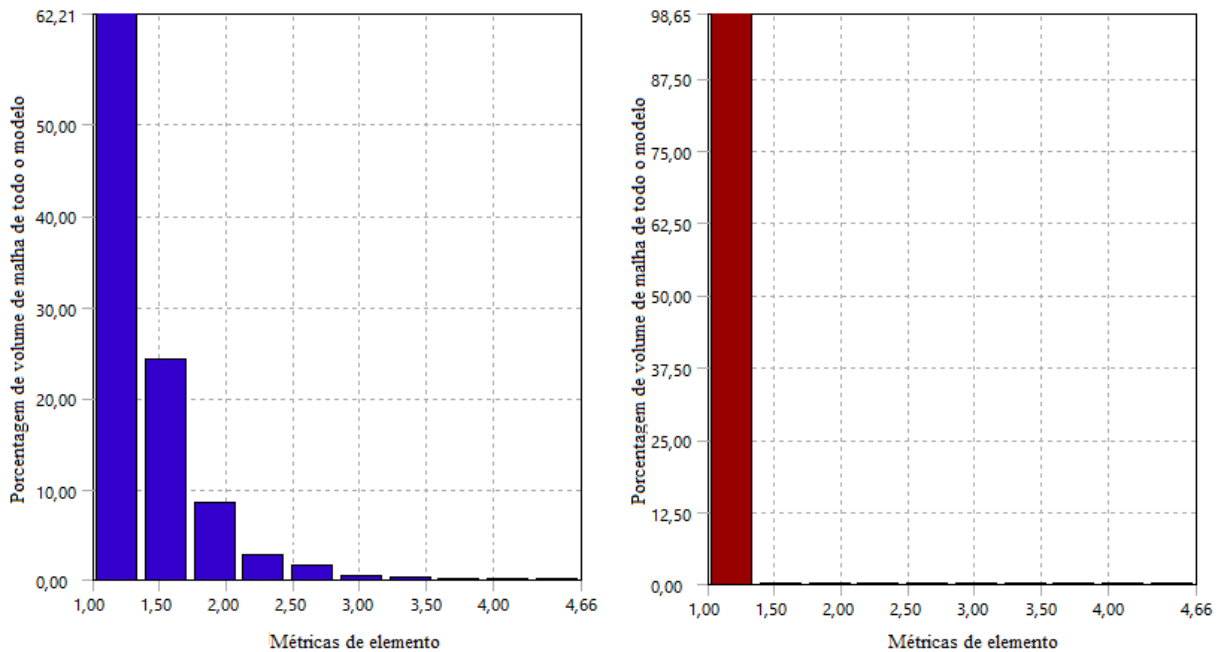


Figura 4 - Gráfico da qualidade por Jacobiano do disco presente em azul e qualidade do volume de controle em vermelho.

2.4.2. Aplicação das condições de contorno

A entrada e saída do fluido é definida em relação a coordenada X, como demonstrado na figura 5, atribuído a temperatura máxima de trabalho ao disco de freio nitretado, seu calor específico e as propriedades do ar, denotando a presença da gravidade igual a 9,81 m/s² em Y.

Atribuição de velocidade estará para o ar, igual a velocidade máxima do veículo pela equalização dos fatores de trabalho. Durante a frenagem a temperatura de trabalho será máxima e apresentará a roda travada, constando o disco imobilizado, mas o veículo ainda apresentará velocidade pelo processo de convergência de uma energia potencial e cinética para calor não ser imediato, havendo equivalência para o trabalho.

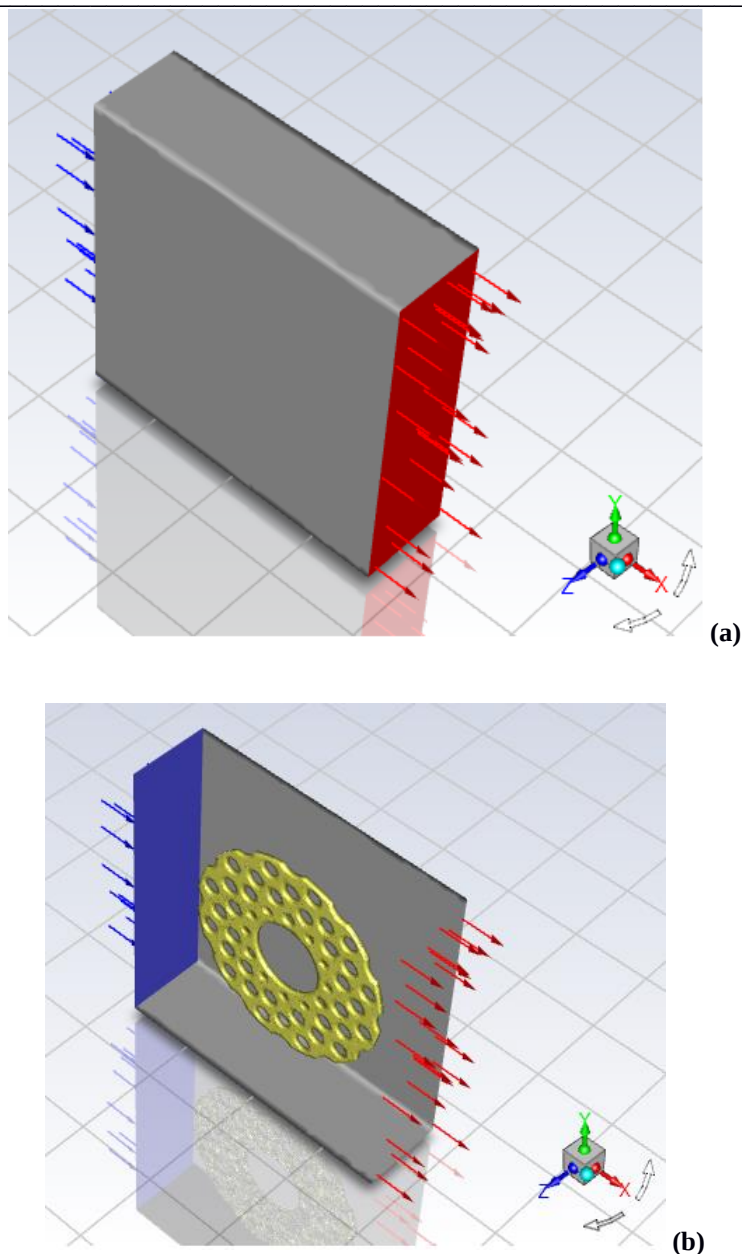


Figura 5 – (a) Representação externa da simulação e (b) Representação interna da simulação.

Para este período crítico a velocidade irá variar de sua máxima para zero, considerando-se a total transformação da energia potencial e cinética para calor; neste caso a análise atribui a velocidade para o ar enquanto percorre o volume de controle, enquanto o disco permanece travada em sua temperatura de trabalho, avaliando a conversão em um regime permanente nesta simulação, resultando na temperatura do ar neste percurso e a partir disso, constando a troca de calor entre os discos e o ar, obtendo a temperatura dos discos utilizando a formula (1), a partir da variação de temperatura do ar em contato com o disco.

Tabela 2 Propriedades do ar em 303 K (Tabela A-15)[5]

Propriedades do Ar	
Densidade (kg/m^3)	1,164
Calor específico ($\text{J}/(\text{kg.K})$)	1,007
Condutividade térmica ($\text{w}/(\text{m.K})$)	0,02588
Viscosidade dinâmica(kg.m/s)	0,00001872

2.4.3. Cálculos e convergência

Para análise do fluido utilizamos o método SIMPLE para determinar a parametrização e convergência. Neste método não há necessidade de apresentar uma expressão para solucionar o sistema linear da pressão, mas com isso

apresenta uma velocidade menor de convergência, utilizando upwind como método de interpolação, diminuindo os gradientes elevados e obtendo dados mais coerentes [3]. O número de iterações inicial foi elevado, constando utilização do método SIMPLE, atribuindo 1000 iterações para a parada do sistema e a malha rustica utilizada.

3. Resultados e discussão

Na convergência dos dados e para definição final da malha foi realizado mais 5 simulações, o necessário para atingir a convergência enquanto mantém a qualidade, definindo a linha de tendência, resultando no gráfico da figura 6. A malha escolhida tem um tamanho de 0,005 m de malha para o volume de controle, enquanto o disco de freio necessita de um refino maior, chegando a 0,001 m para o tamanho da malha, sendo ela tetraédrica.

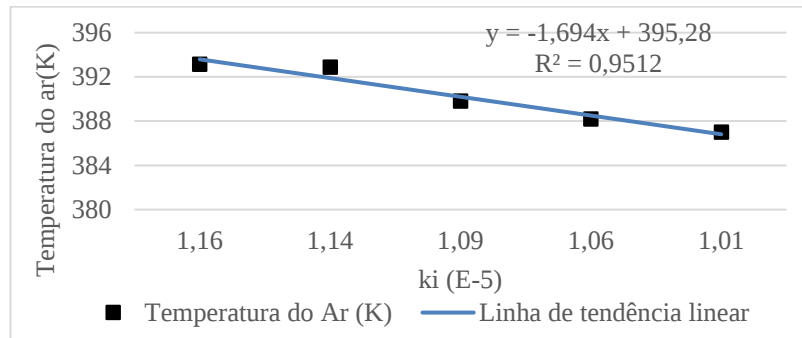


Figura 6 - Gráfico da convergência da malha.

Na quantidade de iterações, aproveitando a sequência de simulações para a malha, foi conferindo e estava acima do nível de convergência, constando que os valores convergem por volta da interação 120.

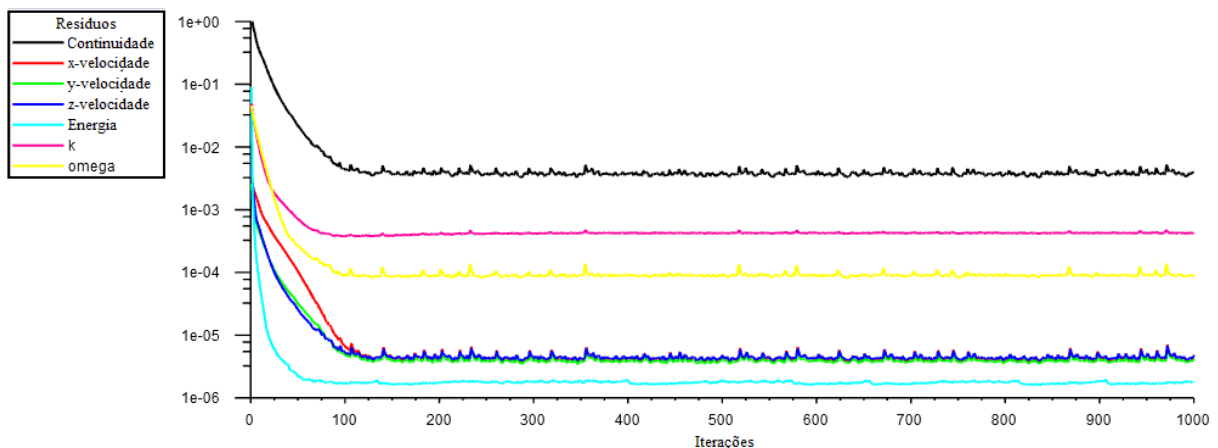


Figura 7 - Gráfico da variação dos parâmetros da simulação.

Neste ponto conseguimos assegurar todos os momentos críticos para a temperatura do disco de freio, avaliando a necessidade de conversão das energias ao momento de resfriamento, tendo a temperatura de trabalho a partir da condução de calor presente na frenagem, atribuindo a variação de temperatura apresentada no ar para o ponto mais crítico da frenagem.

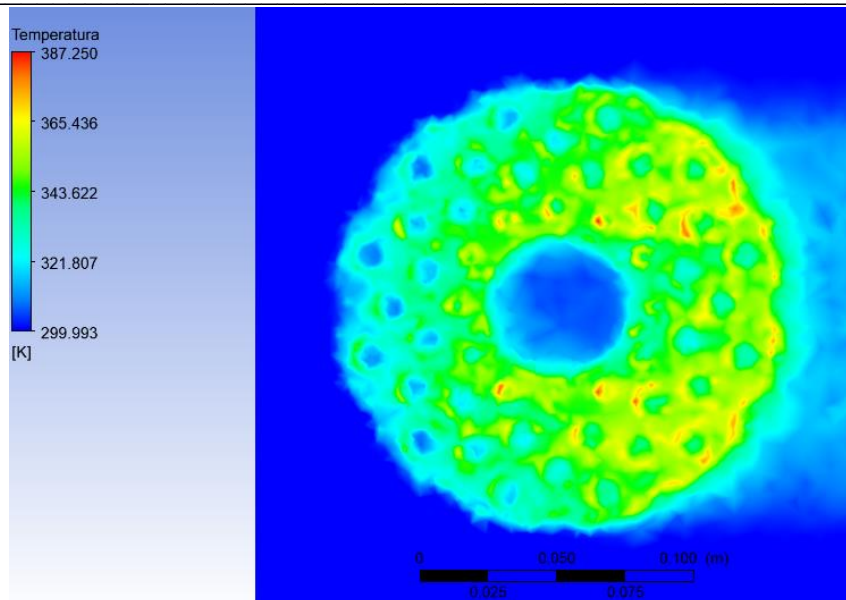


Figura 8 - Simulação da temperatura do ar ao longo da frenagem para um disco padrão.

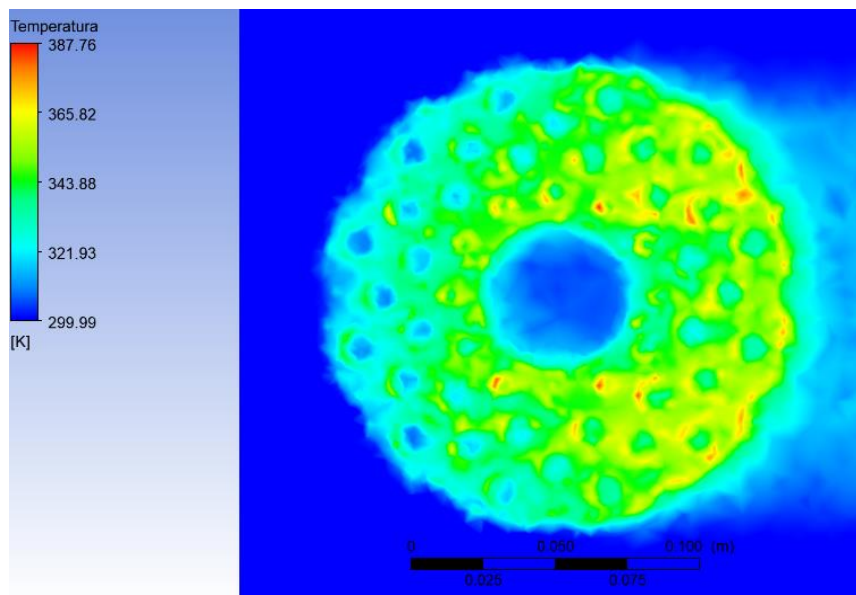


Figura 9 – Simulação da temperatura do ar ao longo da frenagem para um disco nitretado a plasma.

No ponto crítico da frenagem o resfriamento pelo ar do disco tratado a plasma apresenta uma variação de temperatura máxima de 84,76 K, partindo da temperatura ambiente de 303 K até 387,76 K, com uma definição do gradiente de temperatura do ar que entra em contato com o disco na frenagem.

Os gráficos das simulações apresentaram nas condições de contorno consideradas um rendimento termodinamicamente semelhante, considerando que o disco nitretado têm um calor específico menor que o disco padrão, obtendo temperaturas mais altas de trabalho, mas apresentando o mesmo gradiente de temperatura que o padrão, apontando a influência da geometria como um fator mais relevante para o rendimento do resfriamento. Havendo uma pequena diferença de temperatura do ar entre os projetos dos discos, disco padrão apresentando 0,51 K a menos que o nitretado, isso ocorre pela diferença no calor específico dos discos.

Como o disco de freio submetido ao processo de nitretação a plasma apresenta uma melhor performance estrutural que o padrão [2], mas obtém resultados térmicos para uma faixa de temperaturas mais elevadas, deve-se considerar sua utilização em sistemas de freio pouco suscetíveis a mudanças em temperaturas elevadas, sendo necessário considerar os benefícios de desempenho estrutural, aliados ao design dos discos de freio para maximizar a troca de calor com o ar quando houverem limitações de temperatura para os demais componentes do sistema de freios do baja.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho foi desenvolvido como intuito de analisar as características térmicas de projeto em um disco de freio nitretado a plasma que apresentou bons resultados estruturais (tratamento IV), fabricado e comparado sob as mesmas condições de discos convencionais em testes de campo num protótipo baja, sendo estes dados enquadrado para análise, e, obtendo o calor específico e condutividade térmica do disco nitretado, demonstrando que ele apresenta uma variação maior de temperatura em comparação ao disco padrão. A simulação feita por meio do Ansys Student resultou na temperatura do ar durante a frenagem, demonstrando uma igualdade entre os discos analisados, ocorrência denotada pela condutividade térmica não ter sido alterada.

Estes resultados demonstram que o disco nitretado a plasma apresenta um rendimento térmico melhor, pois além de atuar numa maior variação de temperatura, apresentou mesmo padrão de troca de calor com o ar que o disco padrão, e como os estudos preliminares demonstram ganhos no seu desempenho estrutural [2], conclui-se que o a nitretação a plasma é uma boa alternativa de tratamento quando necessário o ganho de desempenho do sistema de freio que necessite trabalhar em zonas de temperatura mais elevadas, típicas de veículos de competição ou que seja submetido a elevados esforços de frenagem.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LIMPert, R Brake Design and Safety, Warrendale, pa: Society of automotive engineers, 1999.
- [2] JÚNIOR, Dácio Germano Xavier Rebouças. Tratamento e avaliação de desempenho de discos de freios de protótipo baja nitretados à plasma. Orientador: Francisco Odolberto de Araújo. 2020. 64 p. Dissertação (Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, MOSSORÓ, 2020.
- [3] MALISKA, C. R. Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional. 2. ed. p. 874
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10966-2: veículos rodoviários automotores - sistema de freio - parte 2: ensaios de frenagem e desempenho para veículos das categorias M, N e O. Rio de Janeiro, p. 23. 2019.
- [5] ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática. Tradução: Fátima A. M. Lino. 4. ed. p. 928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Às 14:00 horas do dia 15 de junho do ano de dois mil e vinte e dois, no formato online, sob a presidência do professor Dr. Francisco Odolberto de Araújo, reuniu-se a Banca examinadora de defesa de monografia de autoria do aluno **RICARDO DIÓGENES MELO CAVALCANTE**, aluno do curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia desta Universidade, com o título "ANALISE TÉRMICA DA NITRETAÇÃO EM UM DISCO DE FREIO BAJA". A Banca examinadora ficou assim constituída: Prof. Dr. Francisco Odolberto de Araújo, presidente da banca e orientador da monografia, Prof. Dr. Júlio César Pereira Barbosa e Me. Dácio Germano Xavier Rebouças Júnior. Foram discutidas e aprovadas a necessidade de alterações textuais referentes a análise final e conclusões. Concluída a defesa, procedeu-se o julgamento pelos membros da banca examinadora, em reunião fechada, tendo o aluno obtido três notas 10,0 (dez vírgula zero). Apuradas as notas verificou-se que o aluno foi aprovado com *média geral 10,0 (dez vírgula zero)*, fazendo jus, portanto, ao título de Bacharel em Ciência e Tecnologia. E para constar, eu, Francisco Odolberto de Araújo, lavrei a presente ata que, após lida e aprovada pelos membros da banca examinadora, será assinada por todos.

Mossoró, 15 de junho de 2020.

Assinatura dos membros da Banca Examinadora.



Dr. Francisco Odolberto de Araújo



Dr. Júlio César Pereira Barbosa



Me. Dácio Germano Xavier Rebouças Júnior