



ARTIGO ORIGINAL

OPEN ACCESS

**PROTOTIPAGEM VIRTUAL APLICADA A SIMULAÇÃO COM SOFTWARE CAE:
PISTÃO DE LIGA DE ALUMÍNIO COM RECOBRIMENTO DE MATERIAL CERÂMICO**

*VIRTUAL PROTOTYPE APPLIED TO SIMULATION WITH CAE SOFTWARE: ALUMINUM ALLOY
PISTON WITH CERAMIC MATERIAL COATING*

Alexandre Santos Zardo¹ & Flávio Lúcio Santos de Carvalho^{2*}

^{1,2}[Centro Universitário Salesiano - Unisaes.](http://www.unisaes.com.br)

¹alexandrezardo@outlook.com ^{2*}fcarvalho@salesiano.br

ARTIGO INFO.

Recebido em: 21.10.2021

Aprovado em: 29.11.2021

Disponibilizado em: 03.12.2021

PALAVRAS-CHAVE:

Pistão. Revestimento. Dióxido de Silício. Ansys®.

KEYWORDS:

Piston. Coating. Silicon Dioxide. Ansys®.

***Autor Correspondente:** Carvalho, F. L. S., de

RESUMO

A inovação em materiais é uma área que visa gerar melhorias nos produtos existentes, através de atividades como PD&I. O setor automotivo é uma das grades áreas em que o investimento na busca por melhores materiais é alto. A engenharia de produto combinada com a simulação e prototipagem virtual permite com que os projetos sejam mais assertivos, com uma redução no tempo de planejamento e nos custos envolvidos. A utilização de materiais cerâmicos em motores de combustão interna ainda necessita de maiores pesquisas para torná-los acessíveis a produção em larga escala, sobretudo por suas particularidades na sinterização e melhores propriedades mecânicas em temperaturas extremas. A presente pesquisa possui o objetivo de propor uma otimização em um motor a combustão interna por centelha do ciclo Otto através da substituição de material de liga metálica no pistão por Compósito de Matriz Metálica (CMM). Para tanto se apoio nas disciplinas de Ciências dos Materiais, Engenharia do Produto e Simulação para a realização do projeto, utilizando os softwares *Inventor®* e *Ansys®* para validar a proposta do protótipo do pistão idealizado, através do recobrimento do pistão de liga de Alumínio

fundido com o cerâmico Dióxido de Silício. Os resultados obtidos foram uma redução na condução de calor em função do tempo, melhores propriedades mecânicas apresentadas e uma redução nos custos envolvidos no processo de utilização de cerâmicos nos motores automotivos.

ABSTRACT

*Innovation in materials is an area that aims to generate improvements in existing products through activities with R&D. The automotive sector is one of the areas where investment is sought for better materials. Product engineering combined with virtual simulation, prototyping allows projects to be more assertive, with a reduction in planning progress, and the costs involved. The use of ceramic materials in internal combustion engines is still necessary for large-scale research, especially because of their sintering particularities and improved mechanical characteristics at extreme temperatures. The present research has the objective of proposing an optimization in an internal combustion engine by cycle of Otto cycle by replacing metal alloy material in the piston by Metallic Matrix Composite (CMM). For support in the disciplines of Material Science, Product Engineering and Simulation for the realization of the project, use of *Inventor®* and *Ansys®* software to validate a proposal of the idealized piston prototype, Aluminum alloy piston exchange fused with Ceramic Dioxide Silicon. The results obtained were a reduction in heat conduction as a function of time, the best mechanical attributes used and a reduction in the costs applied in the process of using ceramic motors in automotive engines.*



1. INTRODUÇÃO

Tendo grande importância na estratégia empresarial, a inovação é apontada como resposta às atuais demandas do contexto em que as organizações estão inseridas como fator de sobrevivência e diferencial competitivo, frente ao desafio de tornar os processos e os produtos mais sustentáveis e eficientes. Fatores como o surgimento do modo de produção *Just in Time* (JIT) no período pós Segunda Guerra Mundial, a utilização intensa do marketing estratégico, o advento da informática a partir da década de 80, a popularização da internet na década de 90 com sua intensificação e acessibilidade a partir dos anos 2000, combinada com o desenvolvimento e modernização de softwares, impactou as organizações fortalecendo a busca pela inovação, sobretudo a tecnológica.

Em determinados setores da indústria, as exigências quanto a inovações tecnológicas são ainda maiores e fundamentais, como no caso da automobilística, que foi fortemente influenciada pelo sistema Toyotista de produção, globalização e pelas tecnologias automotivas avançadas, além de necessitar de materiais de alto desempenho, resistência e confiabilidade. Isto acontece dada as condições extremas em que as peças são aplicadas como altas temperaturas e elevado desgaste provocado pelo atrito, como no caso dos componentes dos motores de combustão interna. Os altos investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) possibilitam que seja possível se destacar nesse setor e buscar estabelecer alguma vantagem competitiva, principalmente no desenvolvimento e aperfeiçoamento de novos materiais, como a inserção de compósitos cerâmicos em algumas peças internas dos motores.

Em termos de produção em larga escala, os motores fabricados pelas indústrias automobilísticas são feitos de ligas metálicas, e algumas oportunidades de melhoria são encontradas nesse tipo de motor, como: a variação de medidas do pistão por expansão térmica, o superaquecimento que ocasiona perda na resistência mecânica, as perdas de energia em calor, a necessidade de lubrificação para amenizar o atrito gerado pela movimentação das peças, a redução de densidade, que ocasiona a diminuição do consumo e conseqüentemente provoca a minimização das emissões de gases nocivos para a atmosfera. Através da substituição por materiais avançados é possível otimizar o motor por causa de suas propriedades mecânicas, entretanto a produção desses materiais é de custo elevado o que ocasiona um aumento no valor final, inviabilizando a produção em larga escala e a venda para a grande massa de consumidores. Sendo assim, do ponto de vista econômico-financeiro, tecnológico, mecânico, quais seriam os impactos e/ou resultados obtidos a partir da adição ou substituição de ligas metálicas, utilizadas na fabricação dos componentes de motores a combustão interna por centelha do ciclo Otto (“ciclo termodinâmico de quatro tempos”), por materiais avançados como compósitos.

Com base nessa pergunta o presente artigo tem por objetivo, propor uma otimização em um motor a combustão interna por centelha do ciclo Otto através da substituição de material de liga metálica no pistão por Compósito de Matriz Metálica (CMM).

Essa substituição de materiais em componentes de um determinado produto, frequentemente visa obter alguma vantagem competitiva nas diferentes características que o compõem, levando em consideração a sua aplicação e os custos envolvidos, agregando valor ao produto, marca, funcionalidade e desempenho. Os materiais compósitos são elaborados com a finalidade de



Citação (APA): Zardo, A. S. & Carvalho, F. L. S., de. (2021). Prototipagem virtual aplicada a simulação com software CAE®: pistão de liga de alumínio com recobrimento de material cerâmico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(4), Edição Especial "Educação 5.0: Inovação e metodologias ativas para o ensino superior", 23-45.

combinar dois ou mais materiais de maneira que juntos suas características físico-químicas sejam superiores. Quando aplicado a fabricação das peças de um motor a combustão interna, a substituição de ligas metálicas por materiais compósitos tende a apresentar resultados benéficos em termos mecânicos e ambientais, obtidos através da comparação dos diferentes indicadores de performance, o que se traduz no aumento da eficiência, redução do consumo e dos gases nocivos na atmosfera. Já em termos de tecnologia aplicada na fabricação, o alto valor empregado de técnicas e a utilização de específicas matérias-primas se mostram como responsáveis para o considerável aumento nos custos envolvidos.

Se os esforços e investimentos em P&D de novos materiais, e a análise do processo de fabricação, propiciam o aumento do alcance e da expansão na aplicação de materiais avançados para o uso na indústria automobilística em diferentes peças, novas soluções poderão surgir para viabilizar o uso de material CMM na câmara de combustão interna de um motor a combustão do ciclo Otto, sob o viés econômico-financeiro e técnico, com a finalidade de reduzir os impactos negativos e obter as vantagens existentes.

A partir da análise desse tipo de motor que obtêm o seu funcionamento através da conversão de calor em trabalho mecânico, quando por exemplo aplicado em um carro, verifica-se algumas perdas na conversão de energia térmica ou química para a mecânica, principalmente por perdas de calor e atrito provocados durante o seu funcionamento, em especial na câmara de combustão, mais precisamente no pistão e no cilindro. Essas peças são fundamentais para o funcionamento do motor e o material que as compõem irá influenciar diretamente na sua performance pois operam em condições críticas de funcionamento, podendo impactar de forma negativa no aumento do consumo de combustível e de óleo para a lubrificação, gerando um maior gasto com manutenção ou ainda a diminuição da vida útil do produto. A substituição de ligas metálicas por materiais compósitos poderá trazer grandes benefícios para o funcionamento do motor, principalmente em termos mecânicos, por apresentarem características que são superiores.

Em relação ao mercado, as inúmeras transformações que vem ocorrendo no cenário atual e as inovações geradas pelo avanço de tecnologias, aumentam a pressão por produtos que sejam mais eficientes, produzidos de forma sustentável e com responsabilidade social. Para atender a esse mercado uma inovação que apresente uma eficiência no motor ocasionado pelo melhor aproveitamento do combustível e dos óleos lubrificantes, poderá provocar impactos em termos econômicos dada ao processo de transportes, que apresenta grande participação no Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, ao possibilitar uma redução nos custos logísticos (consumo, manutenções, e outros). Por consequência essa redução poderá ser repassada ao consumidor final no preço dos produtos, impactando tanto no social por gerar economia e aumento do poder de compra do consumidor, quanto no meio ambiente, por reduzir a pressão sobre os recursos naturais principalmente quanto a extração e ao consumo destes, ao diminuir a poluição provocada pelo consumo de combustíveis fósseis ou pelo processo produtivo de materiais..

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Engenharia do Produto

2.1.1 Processo de Desenvolvimento de Produtos



Citação (APA): Zardo, A. S. & Carvalho, F. L. S., de. (2021). Prototipagem virtual aplicada a simulação com software CAE®: pistão de liga de alumínio com recobrimento de material cerâmico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(4), Edição Especial "Educação 5.0: Inovação e metodologias ativas para o ensino superior", 23-45.

O Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) contempla uma série de atividades para que com base no planejamento estratégico da empresa novos produtos/serviços e processos possam ser lançados. Para isso é preciso considerar as inovações tecnológicas disponíveis e as necessidades do mercado, possibilitando a elaboração das especificações de projeto de um produto e a definição do método de produção, tornando-o possível de ser materializado, além de considerar o acompanhamento e a retirada conforme o ciclo de vida do produto (Hozenfeld *et al.*, 2014). As atividades do PDP visam também dar suporte e estrutura para que o lançamento de produtos/serviços no mercado seja o máximo possível assertivo, mapeando os riscos e incertezas e com isso se antecipar a possíveis prejuízos futuros (Quadro 1).

Quadro 1. Classificação dos tipos de projeto de desenvolvimento de produtos.

Tipos de Projeto de Desenvolvimento de Produtos	Características
Projeto Radical (<i>Breakthrough</i>)	Grandes modificações no projeto do produto através da incorporação de novas tecnologias ou materiais, geralmente com um processo de manufatura também inovador.
Projeto Plataforma ou Próxima Geração	Grandes modificações no projeto do produto, porém, sem a introdução de novas tecnologias ou materiais, mas de novas soluções para o cliente.
Projeto Incremental ou Derivados	Pequenas modificações no projeto do produto, podendo reduzir custos, partindo de produtos e processos existentes, aumentando sua aplicabilidade e ciclo de vida.
Projeto <i>Follow-Source</i>	Sem grandes modificações, projeto adaptado para condições locais, vindo de outras unidades do grupo clientes ou contrato de tecnologia.

Fonte: Adaptado de Hozenfeld *et al.*, (2014).

Por se tratar de um processo realizado em conjunto o PDP integra vários profissionais de diferentes setores da organização, conforme cita Hozenfeld *et al.*, (2014), “Marketing, Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), Engenharia do Produto, Suprimentos, Manufatura e Distribuição – cada um vendo o produto por uma perspectiva diferente, mas complementares”.

Uma área de grande importância para o PDP é o processo de P&D, que visa trazer o domínio da tecnologia através das atividades de pesquisa e desenvolvimento, na forma de prover soluções para problemas específicos com base em soluções de fenômenos físicos e químicos. Essa interação e sinergia ente P&D e PDP contempla o processo de inovação da organização, a partir do qual as soluções tanto poderão ser solicitadas pelo PDP quanto poderão vir a serem originadas pela iniciativa da P&D. (Hozenfeld *et al.*, 2014).

2.2 Ciência e Engenharia dos Materiais

“A Ciência e Engenharia dos Materiais (CEMat) é um campo interdisciplinar voltado a invenção de novos materiais e ao aperfeiçoamento dos já conhecidos, mediante o desenvolvimento da correlação composição-microestrutura-síntese-processamento”. (Askeland & Phulé, 2012). Para efeito de diferenciação e aprofundamento da disciplina de CEMat, é interessante subdividir o conceito em Ciência dos Materiais e Engenharia dos Materiais. A Ciência dos Materiais se aplica a análise das interações entre as estruturas e as propriedades dos materiais, já a Engenharia dos Materiais busca desenvolver processos que possibilitem a conversão e a modificação dos materiais obtidos a partir da Ciência dos Materiais, em mecanismos ou estruturas, propiciando sua aplicação e gerando valor na forma de utilidade. (Askeland & Phulé, 2012; Callister & Rethwisch, 2014).



Citação (APA): Zardo, A. S. & Carvalho, F. L. S., de. (2021). Prototipagem virtual aplicada a simulação com software CAE®: pistão de liga de alumínio com recobrimento de material cerâmico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(4), Edição Especial "Educação 5.0: Inovação e metodologias ativas para o ensino superior", 23-45.

A Ciência dos Materiais classifica os materiais em metais, polímeros e cerâmicas. Cada grupo possui características e finalidades distintas. Segundo Callister e Rethwisch (2014), “As cerâmicas são compostos formados entre os elementos metálicos e elementos não metálicos; na maioria das vezes, são Óxidos, Nitretos e Carbetos”. Existe ainda outra classificação que são os compósitos, que é composto por dois (ou mais) materiais individuais como metais, cerâmicas e polímeros. O objetivo do projeto do compósito é atingir uma combinação de propriedades que não é exibida nos materiais quando utilizados individualmente. (Callister & Rethwisch, 2014)

2.2.1 Materiais Avançados

Os materiais avançados compreendem aqueles que em sua produção, demandam o emprego de alta tecnologia, matérias-primas de elevada qualidade e processos com controle restrito, onde também pesquisas e desenvolvimento podem acarretar elevados ganhos, como exemplo destes materiais têm-se as cerâmicas avançadas e os compósitos-cerâmicos.

As cerâmicas avançadas são definidas como “[...] materiais que necessitem de matérias-primas de alta pureza com composição química e cristalina rigorosamente controlada [...]” (Berg apud Nóbrega, Fritz, & Souza, 2004). Já os materiais compósitos se baseiam da melhor combinação de materiais com características específicas.

“De acordo com esse princípio da ação combinada, as melhores combinações de propriedades são criadas através de uma combinação muito criteriosa de dois ou mais materiais distintos”. (Callister & Rethwisch, 2014). Existem vários materiais compósitos com diferentes formações e aplicabilidades, e o desenvolvimento de novas combinações proporcionam grandes saltos em termos de ampliação de todas as propriedades. “A maioria dos compósitos foi criada para melhorar combinações de características mecânicas, tais como rigidez, tenacidade e resistência nas condições ambientes e de altas temperaturas”. (Callister & Rethwisch, 2014).

De modo geral, os materiais avançados possuem a maior demanda e aplicabilidade nas indústrias, principalmente naquelas que requerem constantes inovações em seus produtos visando atender as exigências do mercado atual quanto as funcionalidades e experiências obtidas, tais como: automobilística e aeroespacial, onde se ressaltam estes por necessitarem de materiais de alto desempenho, resistência e confiabilidade, dada as condições extremas em que são aplicados como altas temperaturas e elevado desgaste provocado pelo atrito. Segundo Lucema (2017):

Os materiais compósitos, impulsionados pela indústria aeroespacial e militar, desenvolveram-se de forma bastante significativa nos últimos anos, proliferando em diversas áreas, devido as suas propriedades únicas, tais como: a elevada resistência mecânica, baixa densidade, excelente resistência térmica e à corrosão dentre outras.

Por se tratarem de materiais que demandam alta tecnologia, as pesquisas em desenvolvimento têm importante papel na busca por melhorias, por materiais e/ou combinações de materiais mais eficientes.

2.3 Máquinas Térmicas

Segundo Tipler e Mosca (2012), “Uma máquina térmica é um dispositivo cíclico cujo objetivo é converter a maior quantidade possível de calor em trabalho”. Para que ocorra trabalho será

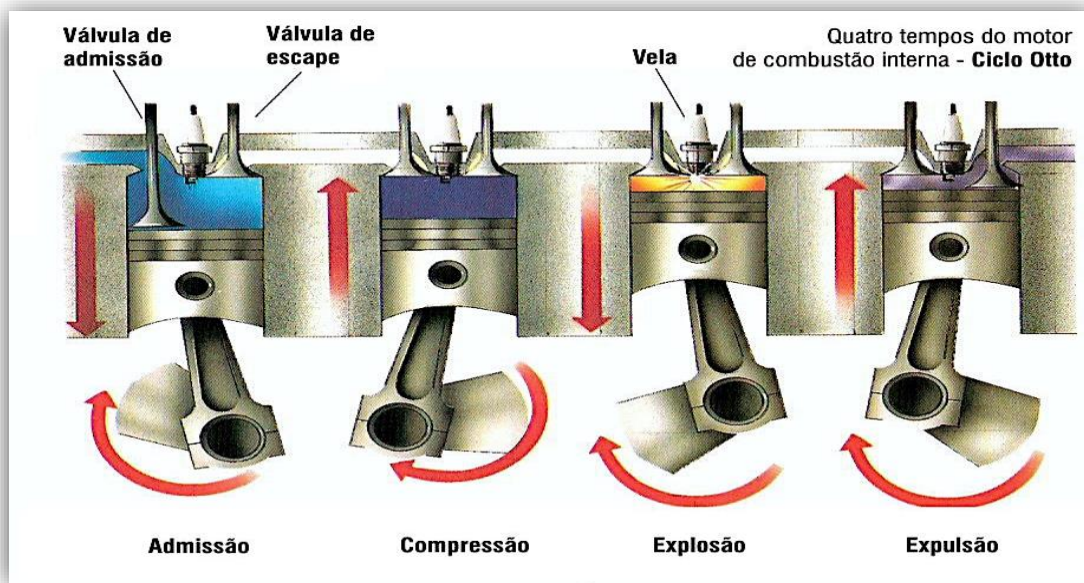


Citação (APA): Zardo, A. S. & Carvalho, F. L. S., de. (2021). Prototipagem virtual aplicada a simulação com software CAE®: pistão de liga de alumínio com recobrimento de material cerâmico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(4), Edição Especial "Educação 5.0: Inovação e metodologias ativas para o ensino superior", 23-45.

preciso que a máquina térmica utilize algum tipo de substância. Um exemplo de máquina térmica é o motor de combustão interna por centelha, presente nos veículos automotores, que utiliza a energia liberada pela queima do combustível para a realização do trabalho, conforme explica Jewett e Serway, (2012), “Esse aparelho usa energia de um combustível para realizar trabalho sobre pistões, que resulta no movimento do automóvel”.

O ciclo Otto é utilizado para representar os processos que ocorrem no motor de combustão interna, por ser considerado ideal e por se aproximar mais. Esse ciclo termodinâmico é composto de quatro processos que ocorrem internamente e são reversíveis (Figura 1).

Figura 1. Os quatro tempos do ciclo Otto de um motor a combustão interna.



Fonte: [Site Multipetro](#).

Dentro do motor de combustão interna, a um componente que tem grande importância para o funcionamento do ciclo Otto que é o pistão. O Quadro 2 descreve algumas das principais funções do pistão.

Quadro 2. Principais funções do Pistão de Combustão Interna.

	Funções
Pistão	Transferir as forças do gás de combustão para a biela.
	Guiar a biela através do cilindro.
	Suportar as forças laterais.
	Selar a câmara de combustão.
	Dissipar o calor absorvido pelo pistão na combustão.
	Configurar a geometria inferior da câmara de combustão favorecendo a mistura e a queima.

Fonte: [Barros](#) ([20--], p. 3).

Como um dos principais meios de transmissão do trabalho gerado pela queima do combustível em movimento, as características do pistão irão influenciar diretamente na eficiência e performance do motor, como seu material, densidade, design e suas medidas.

2.4 Prototipagem Virtual com CAD e Simulação com CAE

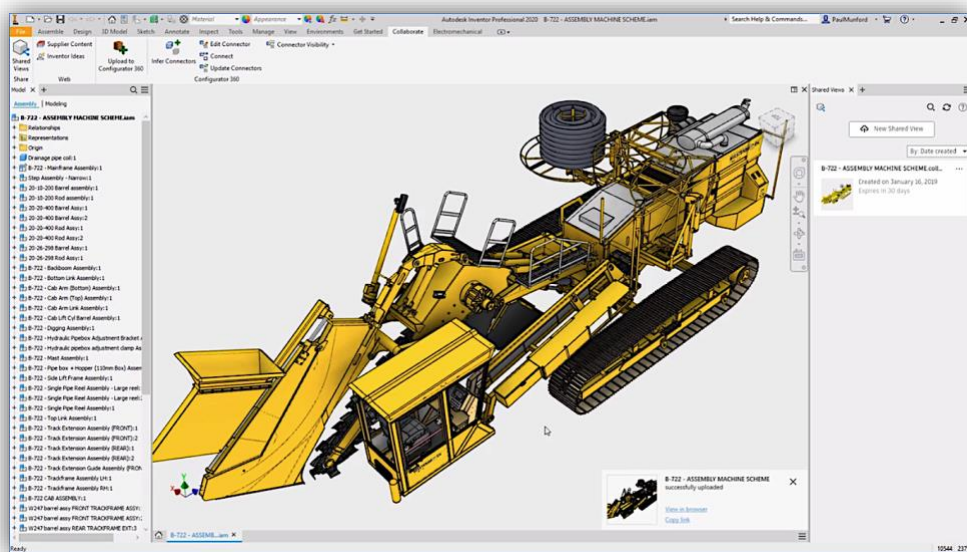


Citação (APA): Zardo, A. S. & Carvalho, F. L. S., de. (2021). Prototipagem virtual aplicada a simulação com software CAE®: pistão de liga de alumínio com recobrimento de material cerâmico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(4), Edição Especial "Educação 5.0: Inovação e metodologias ativas para o ensino superior", 23-45.

As atividades iniciais do PDP são responsáveis por 80% dos custos relacionados ao projeto, por isso é de extrema importância e considerada de forma estratégica a rapidez da validação dos conceitos do projeto. Para tanto se faz necessário a utilização de ferramentas que facilitem o processo de aceleração do mesmo, como as tecnologias assistidas por computador CAD/CAE/CAM, correspondendo respectivamente a abreviação inglesa de: Desenho Assistido por Computador (CAD) do inglês *Computer Aided Design*, Engenharia Assistida por Computador (CAE) do inglês *Computer Aided Engineering*, e Manufatura Assistida por Computador (CAM) do inglês *Computer Aided Manufacturing*. Ao serem utilizadas abreviam o ciclo de desenvolvimento dos produtos novos por meio das funcionalidades de simulação e experimentação fornecidas pelos softwares. (Filho *et al.*, 2011).

Para a criação de protótipos virtuais é essencial o uso de softwares CAD 3D que através do modelamento por sólido, permitem a construção da geometria e do design da peça, conforme o projeto adotado. O fator preponderante para a escolha do software CAD se dará conforme os conhecimentos do projetista ou design, ou mesmo o que melhor atenderá as especificações do projeto. Entre os vários tipos de software CAD existentes no mercado cita-se o Autodesk® *Inventor Professional*, que “[...] é a ferramenta base para desenvolvimento de protótipos digitais. Modelos em 3D que permitem a análise e testes virtuais, diminuindo a necessidade de criação de protótipos físicos, o que resulta em diminuição de custos”. (Cruz, 2011) (Figura 2).

Figura 2. Interface Gráfica do Software Autodesk® Inventor Professional 2020.



Fonte: *Print Screen* de Vídeo do Site Autodesk®.

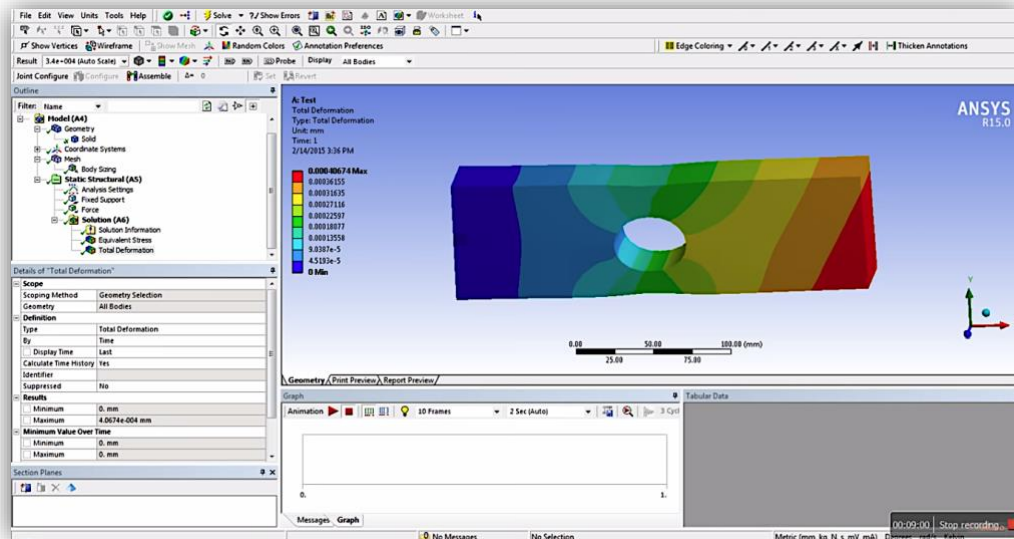
Os softwares CAE são usados principalmente na tomada de decisão dos ajustes necessários ao projeto do produto, por propiciarem a simulação e consequentemente a validação, além da diminuição do tempo em projetos de engenharia, pois permitem a sua utilização nas metodologias de construção de novos produtos, acelerando os processos envolvidos. A simulação é baseada no Método de Elementos Finitos (MEF) que é atualmente definido como sendo um método com matemática aplicada para prover resultados aproximados das equações



Citação (APA): Zardo, A. S. & Carvalho, F. L. S., de. (2021). Prototipagem virtual aplicada a simulação com software CAE[®]: pistão de liga de alumínio com recobrimento de material cerâmico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(4), Edição Especial "Educação 5.0: Inovação e metodologias ativas para o ensino superior", 23-45.

diferenciais parciais. (Nepomuceno, 2015). Um exemplo desse tipo de software é o ANSYS[®] (Figura 3).

Figura 3. Interface Gráfica do Software ANSYS[®].



Fonte: *Print Screen* do Vídeo ANSYS[®] [Workbench Tutorial](#).

3. METODOLOGIA

A presente pesquisa quanto aos objetivos se enquadrou como sendo de caráter exploratório, porque se orientou a propor uma solução que otimizasse o desempenho do pistão dentro do cilindro, durante o seu funcionamento no ciclo de combustão em quatro tempos, para potencialmente apresentar uma inovação na utilização de materiais compósitos na indústria automotiva. Em relação à abordagem se classificou como quantitativa, porque o uso de dados numéricos possibilitou a comparação dos materiais definidos na pesquisa e dos resultados obtidos por meio da simulação.

Para os procedimentos técnicos foi utilizado o formato de estudo de caso para uma completa abordagem do tema e aprofundamento quanto a aplicação de materiais avançados do tipo CMM. Ressalta-se que a presente pesquisa teve como base um Projeto de Inovação Tecnológica com a cooperação de um pesquisador para viabilizar a utilização de materiais avançados na indústria automotiva.

A pesquisa foi realizada no Centro Universitário Católico de Vitória, localizado na cidade de Vitória, no estado do Espírito Santo, durante o período de 11 de março até 18 de novembro de 2019. Vale ressaltar que o Projeto de Inovação Tecnológica em que a pesquisa se apoiou foi realizada simultaneamente no mesmo local mencionado anteriormente.

A pesquisa teve o seu início através da revisão bibliográfica de artigos e monografias, de temas semelhantes ou mesmo com outra abordagem, com o objetivo de levantar informações sobre os resultados obtidos e as técnicas utilizadas. Após o levantamento inicial das informações, foi feita a caracterização dos dados de projeto típicos de motores a combustão interna e das



Citação (APA): Zardo, A. S. & Carvalho, F. L. S., de. (2021). Prototipagem virtual aplicada a simulação com software CAE®: pistão de liga de alumínio com recobrimento de material cerâmico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(4), Edição Especial "Educação 5.0: Inovação e metodologias ativas para o ensino superior", 23-45.

condições de serviço do pistão, com o propósito de estabelecer parâmetros para as medidas do protótipo e a escolha dos materiais cerâmicos mais adequados para a aplicação mencionada.

O próximo passo foi a construção do protótipo virtual para possibilitar o uso da simulação, em que se utilizou o software *Autodesk® Inventor Professional* para a elaboração da geometria do pistão, já com a modificação necessária na peça representando o espaço necessário para o recobrimento. Para isso foi preciso definir as medidas do pistão e o seu design conforme o modelo do motor a combustão interna adotado. Com a construção do protótipo virtual finalizada, a próxima etapa foi exportar o projeto para o software ANSYS® 2019 R1 *Academic*, possibilitando a simulação dos esforços mecânicos que a peça irá sofrer durante o seu funcionamento na câmara de combustão. Para tanto foi preciso configurar o projeto da simulação com dois módulos *Transient Thermal* que é a análise térmica, representando duas simulações diferentes, onde uma foi somente para o pistão e a outra para o protótipo. As simulações foram realizadas e os resultados da solução, como os quadros, as imagens e os gráficos foram organizados de modo a facilitar a comparação. Como resultado final espera-se obter resultados mais satisfatórios na comparação do protótipo com o recobrimento mais indicado em relação ao pistão sem essa adição.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das condições de serviço e de projeto do pistão

As medidas dos componentes internos e de critérios de avaliação dos motores fazem parte dos dados de projeto, que são importantes para determinar as diferenças entre os tipos existentes e ainda determinar detalhes de seu funcionamento (Quadro 3).

Quadro 3. Dados de Projeto e Operação Típicos de Motores de Combustão Interna.

Motores	Pequenos	Carros	Caminhões	Grandes	Wankel
Ciclos	2,4	4	4	2,4	4
Razão de Compressão (Rc)	6 - 11	8 - 10	7 - 9	8 - 12	9
Diâmetro do Pistão (B m)	0,05 - 0,085	0,07 - 0,1	0,09 - 0,13	0,22 - 0,45	0,57 l/câmara
Curso/Diâmetro Pistão (L/B)	1,2 - 0,9	1,1 - 0,9	1,2 - 0,7	1,1 - 1,4	
Velocidade (Ver/Min)	4.500 - 7.500	4.500 - 6.500	3.600 - 5.000	300 - 900	6.000 - 8.000
Pressão Média Líquida (atm)	4 - 10	7-10	6,5 - 7	6,8 - 12	9,5 - 10,5
Potência/Volume	20 - 60	20 - 50	25 - 30	3 - 7	35 - 45
Peso-Potência	5,5 - 2,5	4 - 2	6,5 - 2,5	23 - 35	1,6 - 0,9
Melhor Consumo Específico	350	270	300	200	300

Fonte: Adaptado de Nebra (2019, p. 25).

O tipo de projeto de motor considerado para a pesquisa é o de carros movidos a gasolina, que em termos técnicos são os motores a combustão do ciclo Otto. O Quadro 3 mostra a faixa de medida do diâmetro do pistão, dado importante para a construção do protótipo, e a comparação dos demais valores em que se verifica as diferenças nos valores em função do tamanho do motor e do veículo, para alguns critérios a relação é crescente e para outros decrescentes.



Citação (APA): Zardo, A. S. & Carvalho, F. L. S., de. (2021). Prototipagem virtual aplicada a simulação com software CAE®: pistão de liga de alumínio com recobrimento de material cerâmico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(4), Edição Especial "Educação 5.0: Inovação e metodologias ativas para o ensino superior", 23-45.

Em relação as condições de trabalho de um pistão caracterizam-se como sendo extremamente difíceis devido as especificidades que ocorrem durante a sua operação na câmara de combustão, podendo a temperatura chegar até 2.600°C, já as pressões de ignição podem ser de até 250 Bar. Existem fatores agravantes que são as maiores velocidades dos motores e o aumento do curso do pistão, além do fator funcionalidade que exige com que os pistões tenham uma menor densidade, possam vedar de forma mais aprimorada, tenha um consumo menor de óleo e a confiabilidade seja garantida em relação ao seu funcionamento nas condições adversas de temperaturas frias ou quentes. E ainda, a durabilidade deve ser de mais um milhão de quilômetros em veículos para uso comercial. (Mahle, 2019) (Quadro 4).

Quadro 4. Temperatura e Pressão na Câmara de Combustão.

Tempo	Processo	Temperatura	Pressão
1°	Admissão	340 a 400 K	1 atm
2°	Compressão	600 a 750 K	8 a 15 atm
3°	Combustão	2.300 a 2.700 K	30 a 50 atm
4°	Exaustão	900 a 1.100 K	4 a 6 atm

Fonte: Adaptado de UFRGS.

Verifica-se nos parâmetros contidos no Quadro 4 que conforme o movimento do pistão tanto a temperatura quanto a pressão variam dentro de um intervalo muito bem definido e que esses valores são relativamente altos, o que levaria a destruição do motor. Para evitar isso existe o sistema de arrefecimento que possibilita a retirada de calor contido nas paredes da câmara de combustão. (DIAS, 2019) (Quadro 5).

Quadro 5. Temperaturas dos componentes internos com o sistema de arrefecimento.

Componente	Pistão	Câmara de Combustão	Óleo Lubrificante	Válvulas de Admissão	Válvulas de Escape	Vela
Temperatura	320°C	200°C	150°C	120°C	750°C	500°C a 600°C

Fonte: Dias, 2019.

A temperatura de 320°C em que o pistão trabalha é o limite da liga de Alumínio, que é o material que o constitui. Observa-se pelos valores expressos no Quadro 5 que os diversos componentes internos do motor operam com diferentes gradientes térmicos e que o limite do óleo lubrificante de 150°C é a temperatura máxima que as paredes do cilindro podem chegar. Por isso, o sistema de arrefecimento exerce um papel fundamental para o bom funcionamento do motor na estabilização da temperatura interna, para que o mesmo atue com sua temperatura ideal na faixa de 90 a 95°C. (Dias, 2019). Esse parâmetro da temperatura será o utilizado como limite para a simulação do protótipo.

Definidas as condições de serviço e de projeto do motor, tanto a construção da geometria do protótipo como a seleção do material cerâmico utilizado para o recobrimento tiveram como base esses parâmetros.

4.2 Construção do protótipo do pistão no software inventor®

A prototipagem virtual é a processo em que o projeto foi modelado para posteriormente ser testado através do uso da simulação, para isso foi preciso definir o design e as medidas que foram baseadas em um modelo de um pistão. Essa escolha se deu em função da simplificação



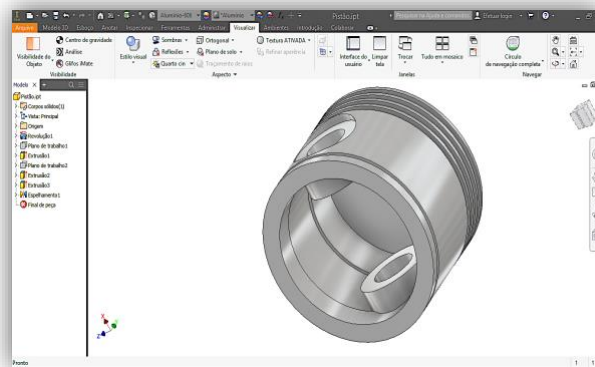
Citação (APA): Zardo, A. S. & Carvalho, F. L. S., de. (2021). Prototipagem virtual aplicada a simulação com software CAE[®]: pistão de liga de alumínio com recobrimento de material cerâmico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(4), Edição Especial "Educação 5.0: Inovação e metodologias ativas para o ensino superior", 23-45.

do problema proposto nessa etapa, para que a concentração do esforço fosse apenas na adaptação do modelo pronto para o protótipo virtual.

No início do processo de modelagem a seguinte questão foi levantada: como construir o modelo de maneira que o software *Inventor*[®] identificasse o recobrimento no pistão? A solução foi a de separá-lo em duas partes: o pistão e o recobrimento, e em seguida fazer a junção das peças em uma montagem, para que a peça referente ao recobrimento se tornasse um espaço identificável, possibilitando a sua configuração em um material diferente do pistão. Por isso o projeto foi dividido em três partes diferentes:

1° - Modelagem do Pistão: a partir de um modelo pronto a peça referente ao pistão foi modelada, e para o seu aspecto conforme o projeto foi selecionado o material Alumínio Polido. As medidas globais do modelo do pistão são 98 mm de diâmetro, 71,7 mm de altura e 189 mm de raio do topo, já no Anexo A encontram-se as cotas com as diferentes vistas (Figura 4).

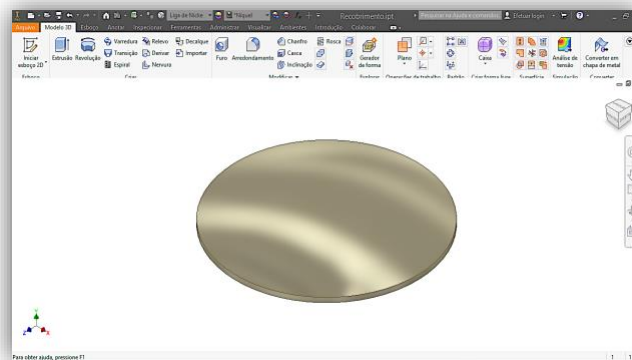
Figura 4. Vista em perspectiva do pistão no *Software Inventor*.



Fonte: *Software Inventor*[®]. (Autores).

2° - Modelagem do Recobrimento: com o pistão finalizado, a construção da peça do recobrimento foi elaborada a partir das medidas do topo do pistão, sendo esse o local onde o recobrimento é aplicado. Para a altura do recobrimento foi adotada a medida de 0,2 mm, para o raio de 189 no diâmetro do topo e nas laterais, sendo um valor compatível para representar uma fina película de camada e para o seu aspecto utilizou-se o material Níquel, que dentre os disponíveis na biblioteca do *Inventor* é o que mais se identifica com a proposta do recobrimento de material cerâmico (Figura 5).

Figura 5. Vista em perspectiva do pistão no *Software Inventor*.



Fonte: *Software Inventor*[®]. (Autores).



Citação (APA): Zardo, A. S. & Carvalho, F. L. S., de. (2021). Prototipagem virtual aplicada a simulação com software CAE®: pistão de liga de alumínio com recobrimento de material cerâmico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(4), Edição Especial "Educação 5.0: Inovação e metodologias ativas para o ensino superior", 23-45.

3° - Montagem do Protótipo: com as peças finalizadas o próximo passo consistiu na junção das partes em apenas um modelo, que é o protótipo do pistão. Para isso foi utilizado um recurso do Inventor que fez o encaixe das peças conforme a configuração do projeto. A Figura 6 mostra o protótipo do pistão finalizado.

Figura 6. Design do Protótipo do Pistão no *Inventor*®.



Fonte: Software Inventor®. (Autores).

Com o protótipo virtual do pistão finalizado verifica-se que o mesmo atende aos requisitos estabelecidos para o projeto, podendo assim dar continuidade ao processo.

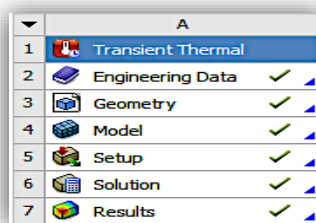
Os arquivos das peças foram exportados para o formato CAD pelo recurso do software *Inventor*® para o tipo *STEP*, possibilitando sua importação para o *Ansys*.

4.3 Simulação do protótipo do pistão no software CAE

4.3.1 Configuração dos dados do projeto no ANSYS

Entre os módulos de simulação do *Ansys* utilizou-se a análise *Transient Thermal* (térmica transitória) conforme mostra a Figura 7, para verificar o comportamento da temperatura em função do tempo durante a aplicação, e o recurso temperatura foi adicionado na solução para o retorno dos dados obtidos. A simulação foi realizada de duas formas diferentes: a primeira apenas com o pistão (sem o recobrimento) e a outra com o protótipo do pistão (com o recobrimento), possibilitando assim a comparação e a influência do recobrimento sobre o pistão. Em um mesmo projeto criado no *Ansys* dois módulos *Transient Thermal* foram colocados para os dois tipos de peças, sendo o pistão o módulo A e o protótipo o B. Para o detalhamento do processo cada etapa foi comentada para os dois módulos juntos com o objetivo de facilitar a comparação, porém na execução foram realizados de forma separada.

Figura 7. Módulo *Transient Thermal*.



Fonte: Software Ansys 2019 R1 – Academic.



Citação (APA): Zardo, A. S. & Carvalho, F. L. S., de. (2021). Prototipagem virtual aplicada a simulação com software CAE®: pistão de liga de alumínio com recobrimento de material cerâmico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(4), Edição Especial "Educação 5.0: Inovação e metodologias ativas para o ensino superior", 23-45.

Ao selecionar o módulo *Transient Thermal* no software *Ansys*, primeiramente foi configurado os materiais do projeto utilizados para a simulação, para tanto utilizou-se a biblioteca de materiais do próprio software, através da opção *Engineering Data* (Dados de Engenharia). Entre as opções disponíveis de materiais cerâmicos e de ligas de Alumínio, foi feita uma seleção que teve como base as condições de serviço, de projeto do pistão e outros critérios, como: os utilizados no mercado, citados em algumas fontes, e nas características mecânicas, como: Coeficiente de Expansão Térmica, baixo valor de densidade e elevado Ponto de Fusão, sendo o principal a baixa Condutividade Térmica para atuarem como isolante térmico. O Quadro 7 apresenta as propriedades mecânicas da liga de Alumínio utilizada para o pistão e o Quadro 8 os cerâmicos selecionados para o recobrimento.

Quadro 7. Propriedades mecânicas da liga de Alumínio fundido.

	Propriedades	Aluminium alloy, cast
Constantes	Resistividade Isotrópica	4,4e-008 ohm m
	Densidade	2680 kg m ⁻³
Elasticidade Isotrópica	Módulo de Young	7,3e+010 Pa
	Relação de Poisson	0,33
	Módulo em Massa	7,1569e+010 Pa
	Módulo de Cisalhamento	2,7444e+010 Pa
Condutividade Térmica Isotrópica	Condutividade Térmica	152 W m ⁻¹ C ⁻¹
Coeficiente Isotrópico Secante de Expansão Térmica	Coeficiente de Expansão Térmica	2,15e-005 C ⁻¹
	Temperatura de Referência de Deformação Térmica Zero	22°C
Pressão Constante de Calor Específico	Calor Específico	963 J kg ⁻¹ C ⁻¹
Propriedades Mecânicas	Resistência à Tração	2,05e+008 Pa
	Resistência Final à Tração	2,54e+008 Pa

Fonte: Adaptado do *Ansys 2019 R1 – Academic*.

A liga de Alumínio fundido (*Aluminium alloy, cast*) foi selecionada por ser uma das mais usadas em escala comercial para aplicações em motores automotivos, porém a biblioteca não fornece uma classificação específica do tipo de liga, nem a proporção dos materiais constituintes da mesma.

Quadro 8. Propriedades mecânicas dos quatro tipos de cerâmicos.

Propriedades	Nitreto de Silício (Si ₃ N ₄)	Carbeto de Silício (SiC)	Dióxido de Silício (SiO ₂)	Óxido de Alumina (Al ₂ O ₃)
Condutividade Térmica Isotrópica J m ⁻¹ s ⁻¹ C ⁻¹	33	99,5	1,5	24
Densidade kg m ⁻³	3190	3100	2220	3700
Pressão Constante de Calor Específico J kg ⁻¹ C ⁻¹	606	670	745	880

Fonte: Adaptado do *Ansys 2019 R1 – Academic*.

Os recobrimentos selecionados se classificam conforme o tipo de cerâmica avançada, sendo o Si₃N₄ um Nitreto, o SiC um Carbeto, Al₂O₃ um Óxido e o SiO₂ um Dióxido, tendo assim um representante para cada tipo. Entre esses o Dióxido de Silício (*Silicon Dioxide*) foi o selecionado para a simulação por ter o menor coeficiente de Condutividade Térmica, podendo atuar como isolante térmico. O percentual da quantidade de material em cada cerâmico não é fornecido pela biblioteca do *Ansys*.

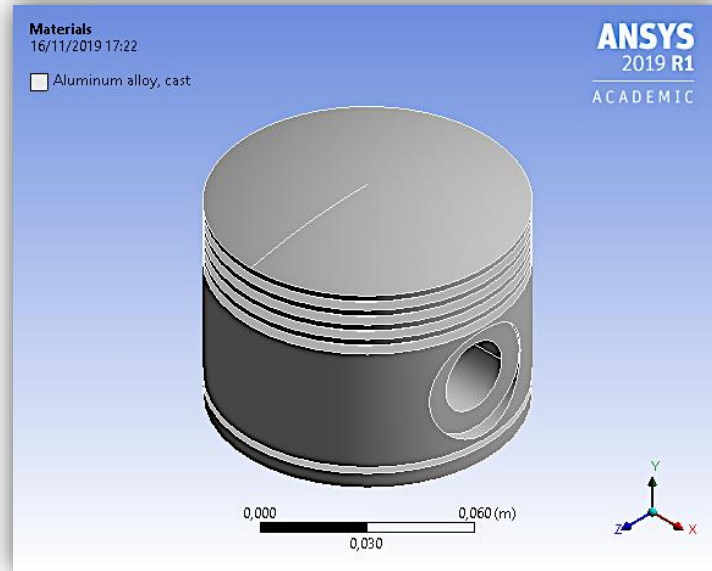
Após a configuração dos materiais foi selecionada a geometry (geometria) da peça já construída, logo depois foi feito o processo de importação para o *Ansys* pelo módulo do *Design*



Citação (APA): Zardo, A. S. & Carvalho, F. L. S., de. (2021). Prototipagem virtual aplicada a simulação com software CAE®: pistão de liga de alumínio com recobrimento de material cerâmico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(4), Edição Especial "Educação 5.0: Inovação e metodologias ativas para o ensino superior", 23-45.

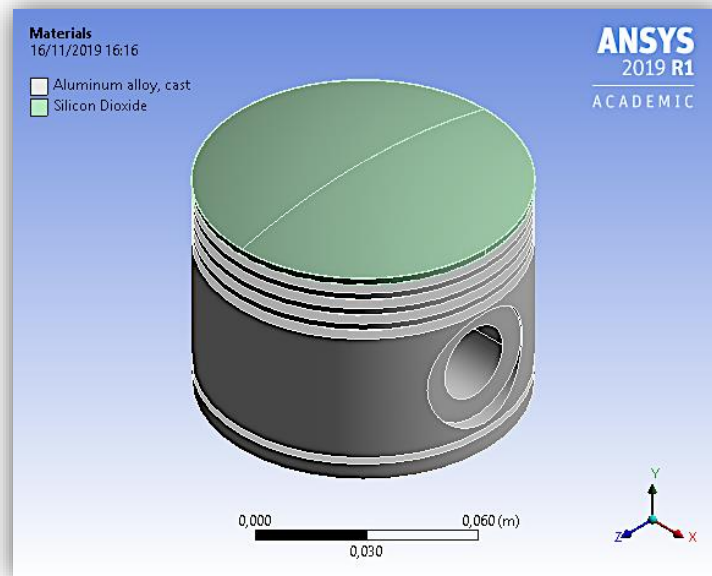
Modeler, possibilitando sua abertura no *Transient Thermal - Mechanical* (mecânica) onde foi executada a simulação. No *Mechanical* o tipo de material foi selecionado sendo o do pistão o *Aluminium alloy cast*, e para o recobrimento o *Silicon Dioxide* (Figuras 8 e 9).

Figura 8. Seleção do *Aluminium alloy cast* para o pistão.



Fonte: Ansys 2019 R1 – Academic.

Figura 9. Seleção do *Silicon Dioxide* para o protótipo do pistão.



Fonte: Ansys 2019 R1 – Academic.

Para a definição da malha buscou-se o melhor refinamento possível, pois como a licença é do tipo *Academic* tem uma limitação para o uso de processamento. As configurações feitas no *Mesh* estão apresentadas no Quadro 9, sendo essas as principais, as outras permaneceram conforme o padrão do software.



Citação (APA): Zardo, A. S. & Carvalho, F. L. S., de. (2021). Prototipagem virtual aplicada a simulação com software CAE®: pistão de liga de alumínio com recobrimento de material cerâmico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(4), Edição Especial "Educação 5.0: Inovação e metodologias ativas para o ensino superior", 23-45.

Quadro 9. Configuração do *Mesh* (Malha).

Mesh do Pistão		Mesh do Protótipo	
Sizing		Sizing	
<i>Use Adaptive Sizing</i>	<i>Yes</i>	<i>Use Adaptive Sizing</i>	<i>Yes</i>
<i>Resolution</i>	<i>2</i>	<i>Resolution</i>	<i>Default (2)</i>
<i>Mesh Defeaturing</i>	<i>Yes</i>	<i>Mesh Defeaturing</i>	<i>Yes</i>
<i>Defeature Size</i>	<i>Default</i>	<i>Defeature Size</i>	<i>Default</i>
<i>Transition</i>	<i>Fast</i>	<i>Transition</i>	<i>Fast</i>
<i>Span Angle Center</i>	<i>Fine</i>	<i>Span Angle Center</i>	<i>Fine</i>
<i>Initial Size Seed</i>	<i>Assembly</i>	<i>Initial Size Seed</i>	<i>Assembly</i>
<i>Bounding Box Diagonal</i>	<i>0,14856 m</i>	<i>Bounding Box Diagonal</i>	<i>0,15007 m</i>
<i>Average Surface Area</i>	<i>1,4708e-003 m²</i>	<i>Average Surface Area</i>	<i>1,6293e-003 m²</i>
<i>Minimum Edge Length</i>	<i>1,e-003 m</i>	<i>Minimum Edge Length</i>	<i>1,e-003 m</i>
Quality		Quality	
<i>Check Mesh Quality</i>	<i>Yes, Errors</i>	<i>Check Mesh Quality</i>	<i>Yes, Errors</i>
<i>Error Limits</i>	<i>Standard Mechanical</i>	<i>Error Limits</i>	<i>Standard Mechanical</i>
<i>Target Quality</i>	<i>Default (0.050000)</i>	<i>Target Quality</i>	<i>Default (0.050000)</i>
<i>Smoothing</i>	<i>High</i>	<i>Smoothing</i>	<i>High</i>
<i>Mesh Metric</i>	<i>Element Quality</i>	<i>Mesh Metric</i>	<i>Element Quality</i>
<i>Min</i>	<i>0,19082</i>	<i>Min</i>	<i>3,3075e-002</i>
<i>Max</i>	<i>0,99898</i>	<i>Max</i>	<i>0,99828</i>
<i>Average</i>	<i>0,63946</i>	<i>Average</i>	<i>0,55365</i>
<i>Standard Deviation</i>	<i>0,15338</i>	<i>Standard Deviation</i>	<i>0,24451</i>
Statistics		Statistics	
<i>Nodes</i>	<i>11588</i>	<i>Nodes</i>	<i>24448</i>
<i>Elements</i>	<i>5986</i>	<i>Elements</i>	<i>12679</i>

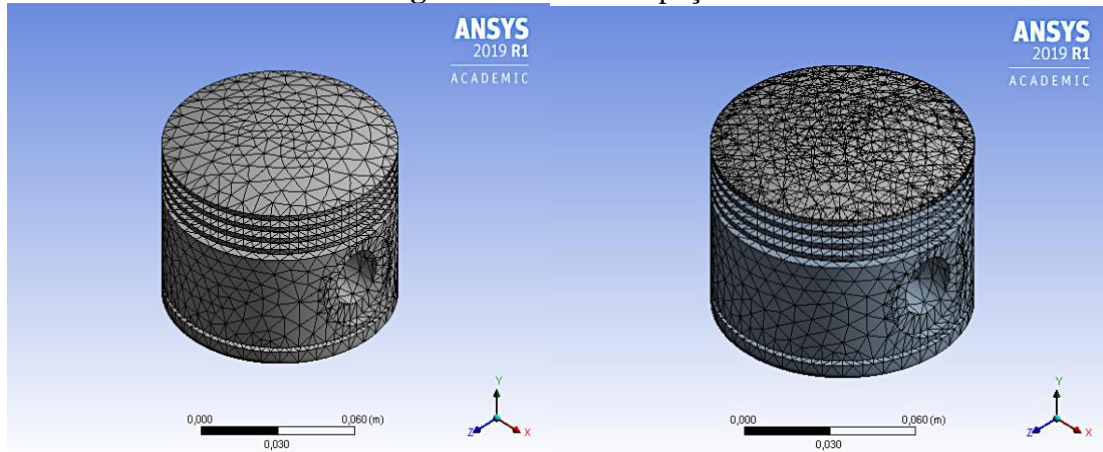
Fonte: Ansys 2019 R1 – *Academic*.

Os ajustes foram feitos nas seguintes opções: no *Span Angle Center* (Centro do Ângulo de Amplitude) em que foi selecionado o tipo *Fine*, no *Smoothing* (Alisamento) foi selecionado o *High* e no *Mesh Metric* (Métrica de Malha) o *Element Quality* (Qualidade do Elemento). Entre as principais diferenças na criação do *Mesh* de cada peça está no número de *Nodes* (nós) e *Elements* (elementos), em que para o protótipo é um pouco maior que o dobro, pois é o valor da soma do *Mesh* do pistão e do recobrimento que juntos formam o protótipo. A Figura 10 apresenta o resultado do *Mesh* sobre as peças, sendo a primeira da esquerda para a direita o pistão e a segunda o protótipo.



Citação (APA): Zardo, A. S. & Carvalho, F. L. S., de. (2021). Prototipagem virtual aplicada a simulação com software CAE®: pistão de liga de alumínio com recobrimento de material cerâmico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(4), Edição Especial "Educação 5.0: Inovação e metodologias ativas para o ensino superior", 23-45.

Figura 10. Mesh das peças.



Fonte: Ansys 2019 R1 – Academic.

A temperatura inicial da simulação foi a padrão do módulo *Transient Thermal* em 22°C, sendo uniforme. Os detalhes constam No Quadro 10.

Quadro 10. Temperatura Inicial.

Object Name	Initial Temperature
State	Fully Defined
Definition	
Initial Temperature	Uniform Temperature
Initial Temperature Value	22, °C

Fonte: Ansys 2019 R1 – Academic.

Em relação ao tempo foi assumido o valor de 300 segundos para *Step End Time* (hora final da etapa), representando 5 minutos com temperatura constante, com o objetivo de se verificar o comportamento da condução de calor em função de um tempo maior, obtendo assim mais dados para a comparação. Para os outros valores dos *Steps* (etapas) são padrão do *Ansys*. Essa configuração é apresentada no Quadro 11.

Quadro 11. Configuração do Tempo de Projeto.

Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	300, s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Initial Time Step	3, s
Minimum Time Step	0,3 s
Maximum Time Step	30, s
Time Integration	On

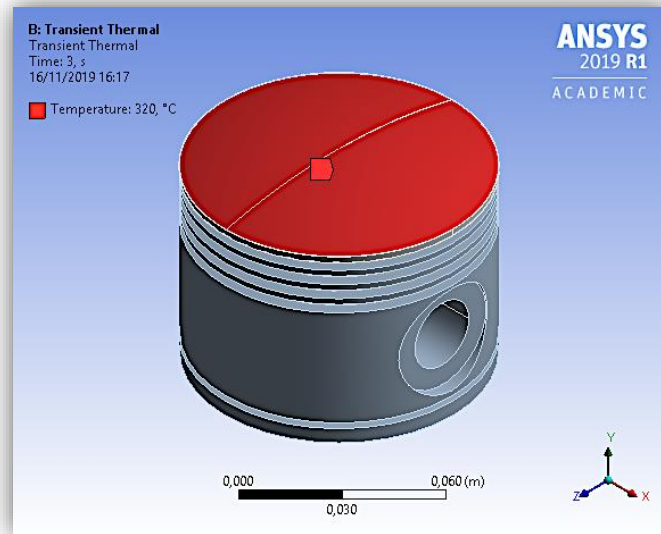
Fonte: Ansys 2019 R1 – Academic.

Para a configuração do local que receberá a condução de calor foi selecionada apenas uma face das peças que é parte superior, representando o calor recebido no momento da explosão pela centelha gerada pela vela. A temperatura foi configurada em 320°C conforme os parâmetros do projeto (Figura 11).



Citação (APA): Zardo, A. S. & Carvalho, F. L. S., de. (2021). Prototipagem virtual aplicada a simulação com software CAE®: pistão de liga de alumínio com recobrimento de material cerâmico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(4), Edição Especial "Educação 5.0: Inovação e metodologias ativas para o ensino superior", 23-45.

Figura 11. Local da aplicação da condução de calor.

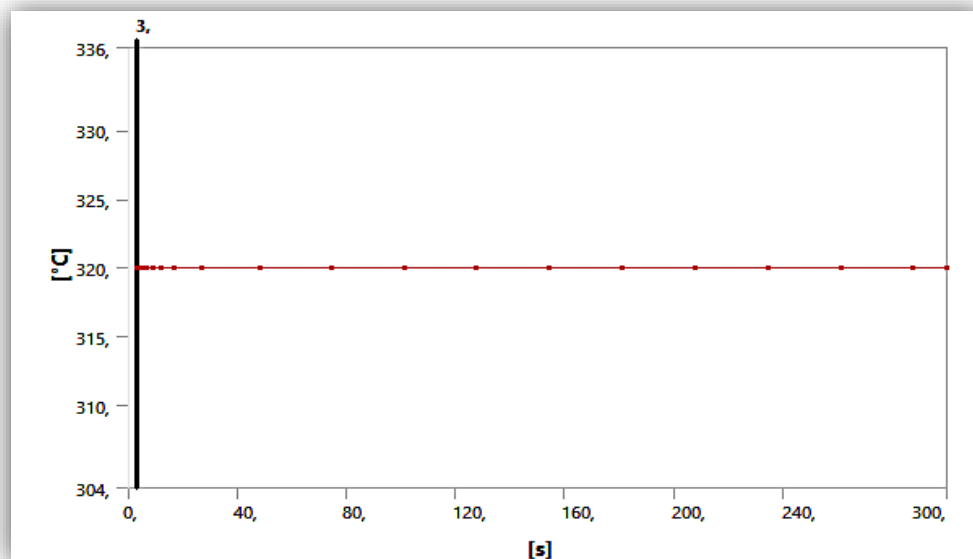


Fonte: Ansys 2019 R1 – *Academic*.

4.3.2 Resultados gerados pela simulação

Com os dados configurados do projeto a função *solver* (solucionador) foi acionada para o início da simulação. Após o tempo de processamento o software *Ansys* retornou os dados da solução na forma de quadros, tabelas, figuras e o vídeo da simulação. A Figura 12 apresenta a temperatura global máxima que foi constante ao longo do tempo total para os dois projetos.

Figura 12. Temperatura Global Máxima das Simulações.



Fonte: Ansys 2019 R1 – *Academic*.

O Quadro 12 mostra os resultados das simulações para as duas situações propostas. Observa-se que a temperatura mínima dos dois projetos apresentou uma pequena diferença de 0,845°C, embora em ambas tenham sido configuradas com a mesma temperatura inicial, já em relação a máxima o protótipo teve uma redução de 2,29°C em relação ao pistão.



Citação (APA): Zardo, A. S. & Carvalho, F. L. S., de. (2021). Prototipagem virtual aplicada a simulação com software CAE®: pistão de liga de alumínio com recobrimento de material cerâmico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(4), Edição Especial "Educação 5.0: Inovação e metodologias ativas para o ensino superior", 23-45.

Quadro 12. Resultados das Simulações.

Pistão de liga de Alumínio fundido		Protótipo do pistão com o recobrimento	
<i>Minimum</i>	318,71 °C	<i>Minimum</i>	316,42 °C
<i>Maximum</i>	320, °C	<i>Maximum</i>	320, °C
<i>Average</i>	319,26 °C	<i>Average</i>	318,06 °C
Minimum Value Over Time		Minimum Value Over Time	
<i>Minimum</i>	23,633 °C	<i>Minimum</i>	22,785 °C
<i>Maximum</i>	318,71 °C	<i>Maximum</i>	316,42 °C
Maximum Value Over Time		Maximum Value Over Time	
<i>Minimum</i>	320, °C	<i>Minimum</i>	320, °C
<i>Maximum</i>	320, °C	<i>Maximum</i>	320, °C
Information		Information	
<i>Time</i>	300, s	<i>Time</i>	300, s
<i>Load Step</i>	1	<i>Load Step</i>	1
<i>Substep</i>	20	<i>Substep</i>	19
<i>Iteration Number</i>	20	<i>Iteration Number</i>	19

Fonte: Ansys 2019 R1 – Academic.

O Quadro 13 mostra as temperaturas obtidas em função do tempo. Nos dados do pistão tem um tempo a mais por conta do próprio software. Verifica-se nesses dados que no tempo de 100 seg existe uma diferença de 21,18°C, logo após essa diferença vai caindo gradativamente.

Quadro 13. Temperaturas obtidas em função do tempo.

Pistão de liga de Alumínio fundido					Protótipo do pistão com o recobrimento			
n	Time [s]	Minimum [°C]	Maximum [°C]	Average [°C]	Time [s]	Minimum [°C]	Maximum [°C]	Average [°C]
1	3	23,633	320	94,57	3	22,785	320	85,84
2	6	28,415		121,05	4	23,174		97,439
3	7	30,403		128,12	5	23,739		107,12
4	8	32,81		134,15	6,8015	25,571		120,75
5	11	43,187		148,32	8,9791	29,179		133,71
6	18,815	77,3		175,84	11,9	36,345		147,34
7	35,405	140,73		215,97	16,66	51,976		164,42
8	56,744	198,77		250,16	26,815	89,083		191,06
9	78,592	239,		273,43	48,097	152,7		228,39
10	100,47	265,98		288,95	74,312	207,36		258,68
11	122,35	283,98		299,3	100,96	244,8		279,12
12	144,24	295,99		306,2	127,64	269,86		292,75
13	166,12	303,99		310,8	154,32	286,57		301,84
14	188,	309,33		313,87	181,	297,71		307,89
15	209,89	312,88		315,91	207,67	305,14		311,93
16	231,77	315,26		317,27	234,35	310,1		314,62
17	253,65	316,84		318,18	261,03	313,4		316,41
18	275,53	317,89		318,79	287,71	315,6		317,61
19	287,77	318,35		319,05	300,	316,42		318,06
20	300	318,71		319,26				

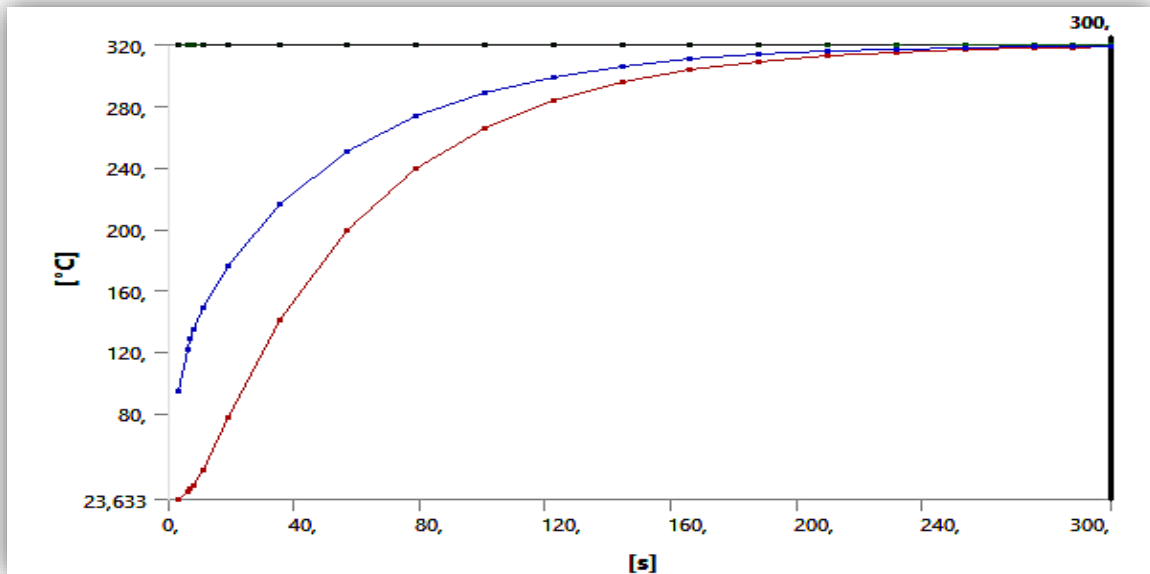
Fonte: Ansys 2019 R1 – Academic.

As Figuras 13 e 14 mostram a variação da temperatura em função do tempo na forma de gráfico.



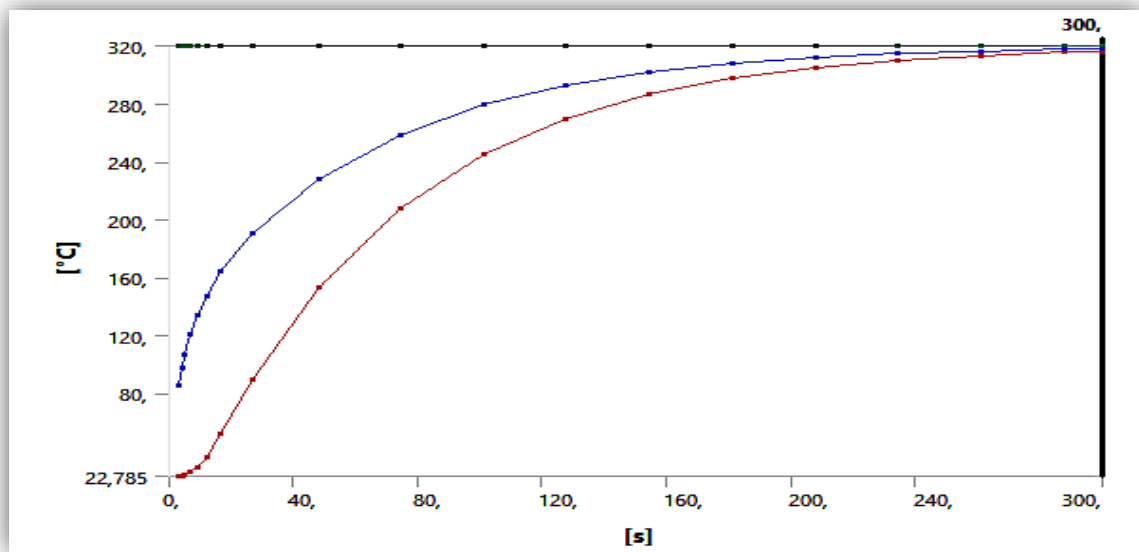
Citação (APA): Zardo, A. S. & Carvalho, F. L. S., de. (2021). Prototipagem virtual aplicada a simulação com software CAE®: pistão de liga de alumínio com recobrimento de material cerâmico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(4), Edição Especial "Educação 5.0: Inovação e metodologias ativas para o ensino superior", 23-45.

Figura 13. Gráfico da temperatura em função do tempo para o pistão.



Fonte: Ansys 2019 R1 – Academic.

Figura 14. Gráfico da temperatura em função do tempo para o protótipo.



Fonte: Ansys 2019 R1 – Academic.

Ao analisar o ângulo da curva verifica-se que no gráfico do pistão a inclinação da reta é mais acentuada no início do que a do protótipo, representando a redução da velocidade da condução de calor pela presença do recobrimento atuando com isolante térmico.

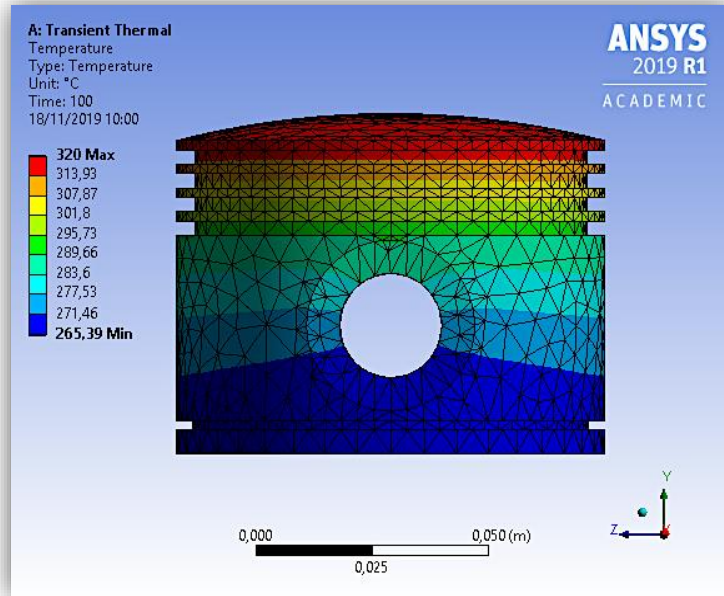
As Figuras 15 e 16 apresentam a variação da temperatura em função do tempo pelas diferentes tonalidades de cor conforme a legenda, no tempo 100 seg, pelo fato de nesse ponto a diferença ser o limite do gradiente térmico crescente, logo após essa diferença vai diminuindo. Pelo gradiente de cor nas Figuras foi possível analisar o diferente comportamento da condução de



Citação (APA): Zardo, A. S. & Carvalho, F. L. S., de. (2021). Prototipagem virtual aplicada a simulação com software CAE®: pistão de liga de alumínio com recobrimento de material cerâmico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(4), Edição Especial "Educação 5.0: Inovação e metodologias ativas para o ensino superior", 23-45.

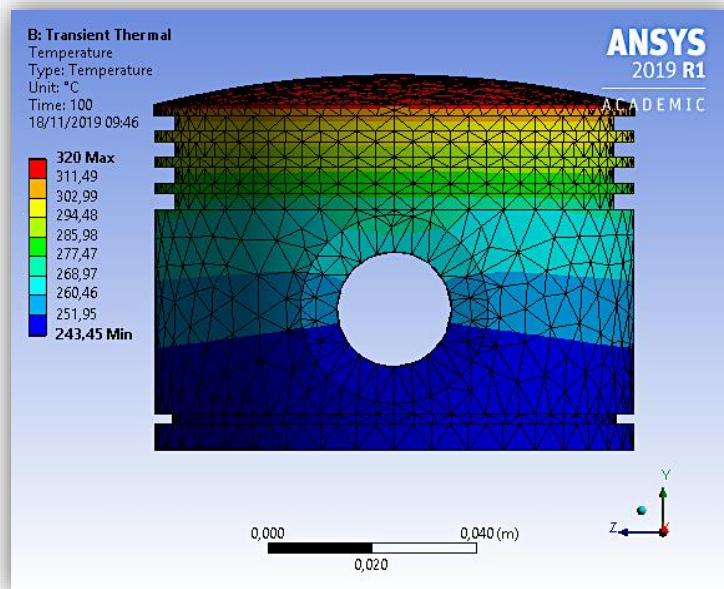
calor, sendo que no pistão a temperatura máxima de 320°C já passou do topo e no protótipo começou a passar do topo.

Figura 15. Variação da temperatura no pistão.



Fonte: Ansys 2019 R1 – Academic.

Figura 16. Variação da temperatura no protótipo.



Fonte: Ansys 2019 R1 – Academic.

Por esses dados exibidos nos quadros, figuras e gráficos é possível afirmar que a aplicação de uma fina película de 0,02 mm de Dióxido de Silício sobre o pistão de liga de Alumínio fundido provoca uma redução na condução de calor através da peça. Do ponto de vista das propriedades mecânicas, isso ocorre principalmente em função do baixo valor de Condutividade Térmica do



Citação (APA): Zardo, A. S. & Carvalho, F. L. S., de. (2021). Prototipagem virtual aplicada a simulação com software CAE®: pistão de liga de alumínio com recobrimento de material cerâmico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(4), Edição Especial "Educação 5.0: Inovação e metodologias ativas para o ensino superior", 23-45.

Dióxido de Silício que conforme a biblioteca do *Ansys* é de $1,5 \text{ W m}^{-1} \text{ C}^{-1}$, sendo assim um isolante térmico de alta intensidade no bloqueio da condução de calor, diferente da liga de Alumínio fundido que possui um valor de $152 \text{ W m}^{-1} \text{ C}^{-1}$, que é um metal. Através da comparação dos dados do pistão sem o recobrimento com o protótipo verifica-se de forma clara a influência que o recobrimento exerce no comportamento da variação da temperatura ao longo do tempo durante a simulação. Com a diferença apresentada de $21,18^\circ\text{C}$ entre o pistão e o protótipo no tempo 100 segundos seria possível aumentar o trabalho do pistão em termos de potência, pois a temperatura ideal do pistão está em torno de 90°C , além desse recobrimento atuar como uma proteção a mais para caso ocorra um superaquecimento por conta de alguma falha ou mesmo por conta do uso. O recobrimento também teria influência no desgaste do pistão, aumentando o ciclo de vida do produto e reduzindo possíveis manutenções desnecessárias.

Em relação ao fator tecnológico no modo de produção existem algumas formas diferentes de aplicação do recobrimento de peças, sendo necessário uma pesquisa mais aprofundada para estabelecer o mais viável. Entretanto do ponto de vista econômico-financeiro sabe-se que utilizar um recobrimento para o pistão ao invés de o produzir completamente de material cerâmico é mais viável economicamente.

O fator custo incide sobre o preço da matéria-prima utilizada e do custo de produção, sendo o Silício um dos elementos mais abundantes da Crosta Terrestre e sua produção se dá de várias formas diferentes, possuindo um preço mais acessível do que outros materiais cerâmicos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A substituição de materiais avançados como cerâmicos ou compósitos nos pistões automotivos visa aproveitar o potencial existente em relação as propriedades mecânicas em função das oportunidades de melhoria existentes, sobretudo nas condições de serviço extremas, entretanto o fator custo e maiores investimentos em desenvolvimento de materiais e processos ainda são fatores impeditivos para o uso comercial. O efeito gerado pela substituição desses materiais impacta diretamente nos custos envolvidos, também por conta da tecnologia empregada. Já nas propriedades mecânicas ocorre uma considerável melhora em termos de operação do motor.

Com isso surge a possibilidade de otimização do motor a combustão interna com alguma alternativa e/ou solução para viabilizar a substituição de materiais. O recobrimento do pistão com Dióxido de Silício mostrou-se satisfatório na comparação com o mesmo sem a sua aplicação, podendo com isso afirmar que o objetivo da otimização foi alcançado, principalmente em reduzir os custos envolvidos no processo. Desse modo pode-se dizer que a hipótese da presente pesquisa em propor novas soluções para viabilizar o uso de material CMM na câmara de combustão interna foi confirmada, com base nos resultados obtidos pela simulação e na análise do processo e de outras variáveis envolvidas como as propriedades mecânicas, a viabilidade econômico-financeira e tecnológica. As vantagens existentes no protótipo do pistão com o recobrimento de Dióxido de Silício apresentaram maior resistência na condução de calor e a aplicação do recobrimento possui uma redução nos custos envolvidos.

Quanto ao caráter exploratório da pesquisa em propor uma inovação na utilização de materiais é possível afirmar com base nos dados dessa pesquisa, que até o presente momento não se tem conhecimento da utilização de Dióxido de Silício em recobrimentos de pistões na forma



Citação (APA): Zardo, A. S. & Carvalho, F. L. S., de. (2021). Prototipagem virtual aplicada a simulação com software CAE®: pistão de liga de alumínio com recobrimento de material cerâmico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(4), Edição Especial "Educação 5.0: Inovação e metodologias ativas para o ensino superior", 23-45.

comercial em larga escala, embora sua aplicação já tenha sido mencionada para outros tipos de utilização.

Como sugestão para trabalhos futuros indica-se a utilização de outras análises no software *Ansys*® como a estática e a de fadiga. Optar por outros recobrimentos em que se utilize o Nióbio, pelo fato de o Brasil ter a maior reserva mundial desse mineral e de ser necessário ainda mais pesquisas para a sua utilização em grande escala para essa finalidade. Recomenda-se também uma análise da durabilidade desse recobrimento em função do seu uso, e se sua reaplicação caso seja necessária é viável economicamente.

6. REFERÊNCIAS

Askeland, D. R., & Phulé, P. P. *Ciência e Engenharia dos Materiais*. São Paulo: *Cengage Learning*. 2012.

Barros, J. E. M. Componentes de Motores de Combustão Interna. Recuperado de http://www.mautone.eng.br/apostilas/motores_combustao_interna/MCI_02D_Componentes.pdf

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). *Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.

Cruz, M. D., da. (2011). *Autodesk Inventor 2012 Professional: Teoria de Projetos, Modelagem, Simulação e Prática*. São Paulo: Érica.

Daly, O. (2015). *Ansys Workbench Tutorial - Introduction to Static Structural*: aula 1. Canadá: DrDalyO. 11 min. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vnpq5zzOS48&t=573s>

Dias, A. L. Sistema de Arrefecimento dos Motores de Combustão Interna. Recuperado de <http://carrosinfoco.com.br/2014/07/sistema-de-arrefecimento-dos-motores-de-combustao-interna-2/>

Filho, E. R. *et al.* (2011). *Projeto do Produto*. São Paulo: Elsevier. Recuperado de <https://books.google.com.br/books?id=I6L5aaXVgyIC&pg=PA298&dq=prototipagem+virtua+l+de+produtos&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwjZhsfSm6HiAhVcDrkGHadiARUQ6AEIKTAA#v=onepage&q=prototipagem%20virtual%20de%20produtos&f=false>

Hozenfeld, H. *et al.* (2016). *Gestão de Desenvolvimento de Produtos: Uma referência para a melhoria do processo*. São Paulo: Saraiva.

Inventor: Software CAD 3D profissional para engenharia e projetos de produtos. Recuperado de <https://www.autodesk.com.br/products/inventor/overview>

Jewett, J. W. Jr., & Serway, R. A. (2011). *Física para Cientistas e Engenheiros: Oscilações, Ondas e Termodinâmica*. 8. ed. São Paulo: *Cengage Learning*.

Lucema, J. F. (2017). *Desenvolvimento e caracterização de compósitos híbridos reforçados a partir de mantas de fibra de vidro descartadas pela indústria eólica e fibras naturais*. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Unidade de Ensino, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro. Recuperado de https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/24839/1/JoseclebioDaFonsecaLucena_D_ISSERT.pdf



Citação (APA): Zardo, A. S. & Carvalho, F. L. S., de. (2021). Prototipagem virtual aplicada a simulação com software CAE®: pistão de liga de alumínio com recobrimento de material cerâmico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(4), Edição Especial "Educação 5.0: Inovação e metodologias ativas para o ensino superior", 23-45.

Mahle. Pistões Mahle: não apenas para a Fórmula 1. Recuperado de <https://www.mahle-aftermarket.com/la/pt/products-and-services/engine-components/pistons/#pist%C3%B5esforjadosdesaias%C3%B3lida>

Motores Diesel. Motores do Ciclo Diesel. Recuperado de <http://www.multipetro.com.br/blog/2018/05/30/motores-diesel/>

Nebra, S. A. Máquinas Térmicas. Recuperado de <http://www.fem.unicamp.br/~em672/Aulas%2019%20-20%20-%202003.pdf>

Nepomuceno, E. G. (2015). Métodos Numéricos: Método dos Elementos Finitos. Recuperado de https://www.ufsj.edu.br/portal2repositorio/File/nepomuceno/mn/23MN_EDO6.pdf

Nóbrega, M. de. J. R., Fritz, M., & Souza, C. G. de. (2004). Inovações Tecnológicas: Aplicação de Materiais Cerâmicos na Indústria Automobilística. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), 24. Anais eletrônicos... Santa Catarina: Abepro. p. 4187-4194. Recuperado de http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2004_Enegep0801_1975.pdf

Tipler, P. A., & Mosca, G. (2012). Física para Cientistas e Engenheiros: Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.

Ufrgs. (2020). Motor de Combustão Interna. Recuperado de <http://www.if.ufrgs.br/cref/leila/motor.htm>

