



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENG. DE MATERIAIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Luisa Coelho de Carvalho

Seleção de liga de alumínio para aplicação em motor de automodelo

Luisa Coelho de Carvalho

Seleção de liga de alumínio para aplicação em motor de automodelo

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de São Carlos como requisito para a obtenção do título de Engenheira de Materiais.
Orientador: Prof. Dr. Piter Gargarella

São Carlos
2024



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: Luisa Coelho de Carvalho

RA: 760460

TÍTULO: Seleção de liga de alumínio para aplicação em motor de automodelo

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Piter Gargarella

DATA/HORÁRIO: 02/02/2024, 13h30

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Piter Gargarella	9	10
Dr. Angelo Fernandes Andreoli	10	10
Média	9.5	10

BANCA – ASSINATURAS:

Prof. Dr. Piter Gargarella

Documento assinado digitalmente
gov.br PITER GARGARELLA
Data: 04/02/2024 11:32:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Angelo Fernandes Andreoli

Documento assinado digitalmente
gov.br ANGELO FERNANDES ANDREOLI
Data: 05/02/2024 09:45:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Aos meus pais, que me apoiaram e estiveram do meu lado em todos
os caminhos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha família pelo apoio em todos os momentos, por serem meu porto seguro e por me incentivarem nos momentos difíceis.

Agradeço também ao meu namorado, Matheus, que esteve em quase toda minha graduação ao meu lado, aos meus amigos, Gabriela, Maria Clara, Beatriz, Augusto, Yan, Matheus, Felipe, André, Maitê, Sofia e Olavo que se mostraram presentes, especialmente durante o duplo diploma na França e contribuíram com minhas conquistas até aqui.

Um agradecimento especial ao Prof. Dr. Piter Gargarella por me orientar e me ensinar tanto nos anos de graduação.

Agradeço à Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e aos professores que lá ensinam, por me mostrarem um mundo acadêmico muito rico e contribuírem fortemente na minha formação.

RESUMO

O automodelismo está cada vez ganhando mais destaque nos dias atuais. A falta de fabricantes no Brasil de pistões de automodelos à combustão exige uma seleção de materiais refinada afim de obter o melhor material para esta aplicação. Há uma falta de informações na literatura, normas e patentes para acessórios de carros automodelos à combustão. A seleção de materiais teórica é confrontada com dados experimentais. Uma investigação experimental foi realizada através de análise química via Espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) e uma análise microestrutural via Microscopia ótica de um pistão automodelo fabricado na Itália. Duas análises químicas realizadas apresentam resultados incoerentes com a microestrutura observada. A microestrutura revela um pistão composto de uma liga alumínio-silício hipoeutética. A dureza obtida de 132HV corresponde a uma liga de alumínio-silício hipoeutética e se encontra dentro da norma ABNT NBR15905 para pistões de automóveis convencionais. Uma seleção de materiais realizada no software Granta Edupack 2020 revelou ligas de alumínio-silício como bons candidatos para esta aplicação, sendo as ligas fundidas da série 3XX.X.

Palavras-chave: pistões de automodelos; seleção de materiais; ligas de alumínio-silício.

ABSTRACT

Remote control car modeling is gaining increasing prominence nowadays. The lack of manufacturers in Brazil for combustion engine model car pistons requires a refined selection of materials to obtain the best material for this application. There is a lack of information in literature, standards, and patents for accessories of combustion engine model cars. The theoretical material selection is compared with experimental data. An experimental investigation was conducted through chemical analysis using Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) and microstructural analysis using Optical Microscopy of a model car piston manufactured in Italy. Two chemical analyses yielded results inconsistent with the observed microstructure. The microstructure reveals a piston composed of a hypoeutectic aluminum-silicon alloy. The hardness obtained of 132HV corresponds to a hypoeutectic aluminum-silicon alloy and complies with the ABNT NBR15905 standard for conventional automobile pistons. A material selection conducted in the Granta Edupack 2020 software revealed aluminum-silicon alloys, specifically the cast alloys of the 3XX.X series, as suitable candidates for this application.

Keywords: car modeling pistons; materials selection; aluminum-silicon alloys.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de um carro automodelo à combustão	1
Figura 2 – Representação esquemática de um pistão automotivo.	3
Figura 3 – Corte do pistão para carros automodelos à combustão recebida.	5
Figura 4 – Seção transversal da amostra embutida em resina polimérica termofixa.	5
Figura 5 – Microscópio eletrônico disponível no laboratório utilizado neste trabalho.	6
Figura 6 – Região e pontos quantificados por EDS da medida 01.	7
Figura 7 – Espectro de EDS da medida 01 realizada na amostra.	8
Figura 8 – Diagrama de fases Al-Si gerado pelo Thermo-Calc utilizando a base de dados TCBIN.	8
Figura 9 – Microscopia ótica da amostra do pistão, aumento de 200x.	9
Figura 10 – Microscopia ótica da amostra do pistão, aumento de 500x.	9
Figura 11 – Microestrutura dendrítica de ligas de alumínio modificadas com Sr, alumínio primário (cinza claro) e matriz eutética de alumínio-silício (cinza escuro), a) Al-3Si; b) Al-5Si e c) Al-7Si (GAN <i>et al.</i> , 2020).	10
Figura 12 – Microestrutura das ligas hipereutéticas de Al-Si fundidas. a) AlSi16 b)AlSi21 e c)AlSi30 (WANG <i>et al.</i> , 2019).	11
Figura 13 – Microestrutura com contraste preto e branco para quantificação de fase clara.	11
Figura 14 – Microestrutura original da amostra do pistão, aumento de 500x.	11
Figura 15 – Diagrama de Ashby - Condutividade térmica x Resistência à tração (nível 1).	13
Figura 16 – Diagrama de Ashby - Resistência à tração x Densidade (nível 1).	14
Figura 17 – Diagrama de Ashby - Temperatura máxima de serviço x Densidade (nível 1).	15
Figura 18 – Diagrama de Ashby - Coeficiente de expansão térmica x Densidade (nível 1).	15
Figura 19 – Diagrama de Ashby - Condutividade térmica x Resistência à tração (nível 3).	16
Figura 20 – Diagrama de Ashby - Resistência à tração x Densidade (nível 3).	17
Figura 21 – Diagrama de Ashby - Temperatura máxima de serviço x Densidade (nível 3).	17
Figura 22 – Diagrama de Ashby - Coeficiente de expansão térmica x Densidade (nível 3).	18
Figura 23 – Diagrama de Ashby - Condutividade térmica x Resistência à tração (ligas de Al - nível 3).	20
Figura 24 – Diagrama de Ashby - Resistência à tração x Densidade (ligas de Al - nível 3).	21
Figura 25 – Diagrama de Ashby - Temperatura máxima de serviço x Densidade (ligas de Al - nível 3).	21
Figura 26 – Diagrama de Ashby - Coeficiente expansão térmica x Densidade (ligas de Al - nível 3).	22
Figura 27 – Gráfico do limite de elasticidade x temperatura para a liga A336.0 (GRANTA EDU-PACK. . . , 2020).	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química global da amostra obtida via EDS acoplado ao MEV.	7
Tabela 2 – Composição química pontual da amostra obtida via EDS acoplado ao MEV.	9
Tabela 3 – Porcentagem de fase clara na microestrutura apresentada na Figura 13	12
Tabela 4 – Medidas de dureza Vickers realizada no CCDM.	12
Tabela 5 – Comparação das propriedades dos materiais estudados no nível 1 do software Ansys Granta EduPack.	16
Tabela 6 – Comparação das propriedades dos materiais estudados no nível 2 do software Ansys Granta EduPack.	18
Tabela 7 – Valores de condutividade térmica de alguns metais (NOBRE, 2023).	20
Tabela 8 – Composição química das ligas de alumínio selecionadas.	22
Tabela 9 – Composição química realizada pelo Instituto de Pesquisas e Estudos Industriais em 28 de abril de 2015.	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCDM	Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais
DEMa	Departamento de Engenharia de Materiais
EDS	Espectroscopia de Energia dispersiva de raios X
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MO	Microscopia ótica
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1	AUTOMODELOS À COMBUSTÃO	2
2.2	PISTÕES PARA AUTOMODELOS À COMBUSTÃO	2
2.2.1	Introdução	2
2.2.2	Propriedades, requisitos e materiais utilizados	3
3	MATERIAIS E MÉTODOS	5
3.1	ANÁLISE EXPERIMENTAL	5
3.1.1	Análise química	5
3.1.2	Microscopia ótica	5
3.2	SELEÇÃO DE MATERIAIS	6
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	7
4.1	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	7
4.1.1	Análise química	7
4.1.2	Análise por microscopia ótica	9
4.2	RESULTADOS DA SELEÇÃO DE MATERIAIS	13
4.2.1	Identificação da classe de material - nível 1	13
4.2.2	Identificação do grupo de material - nível 2	16
4.2.3	Identificação do material a ser utilizado no pistão automodelo - nível 3	16
<i>4.2.3.1</i>	<i>Seleção de ligas de alumínio</i>	<i>19</i>
5	CONCLUSÃO	24
	REFERÊNCIAS	25
	ANEXO A – Análise química	28

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVO

O automodelismo surge em meados do século XX com os europeus colecionando carros em miniatura. Com o passar do tempo e o avanço da tecnologia, esse *hobby* começa a ganhar mais espaço, dando origem aos automodelos de controle remoto que, posteriormente, passou de apenas colecionadores para uma prática profissional.

Os carros automodelos possuem diversos tipos e modelos que variam em uma grande gama de preços. Na Figura 1 está representado um tipo. Esses carrinhos podem ser montados de acordo com a preferência, modificando diversas peças, como motor, chassi, pistões, entre outras.



Figura 1 – Exemplo de um carro automodelo à combustão

No entanto, no mercado brasileiro, essas modificações são um pouco complicadas. Quando realiza-se a busca por diversos acessórios desses carrinhos, como motores, velas de ignição, pistões, filtro de ar, na internet, o número de artigos disponíveis são extremamente reduzidos e disponíveis em sites que é necessário uma boa análise para avaliar a confiabilidade dos produtos ou estão disponíveis em marketplaces, como MercadoLivre e Magalu, mas que exigem uma avaliação cautelosa antes de adquirir os artigos. Além disso, a maioria desses produtos são importados para o Brasil. No caso dos pistões, por exemplo, não há fabricante nacional e o principal fabricante dos pistões para automodelos está situado na Itália. Em uma breve pesquisa na literatura e em normas e patentes disponíveis no banco de dados oferecido pela UFSCar, observamos também uma falta de informação sobre os pistões automodelos. Há informações disponíveis sobre pistões automotivos, porém apesar de várias similaridades nos requisitos durante o funcionamento do motor, apresentam alguns componentes diferentes dos pistões automotivos convencionais, como por exemplo a inexistência dos anéis, que implicam em algumas propriedades diferentes e, possivelmente, composições diferentes.

Recentemente, houve contato de um empresário interessado em produzir pistões para automodelos, o qual relatou que não existe fabricante de peças desse tipo no Brasil. Esse empresário forneceu um exemplar de pistão usado em automodelo para análise. Assim, a partir da conversa, definiu-se o objetivo deste trabalho de conclusão de curso que foi de realizar a seleção de materiais para aplicação em pistões de automodelos. Para atingir esse fim, foi realizado o trabalho de revisão da literatura e também de caracterização química e microestrutural do exemplar obtido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AUTOMODELOS À COMBUSTÃO

A prática de automodelismo em automóveis de controle remoto estão cada vez mais comum como um passatempo para moradores de grandes cidades. As corridas acontecem com automóvel radio controlado. Existem dois modelos, os movidos à combustível e os elétricos. Considerado como um esporte bastante competitivo, os automóveis contam com a preparação de motor, chassis, com escolha de pneus e acessórios, visando-o que seja o mais rápido da competição.

Os carros à combustão automodelo possuem todos os componentes que um automóvel tem, mas em uma escala que vai de 1/5 a 1/10 do tamanho real (HOBBIES, 2019). O automodelo utiliza um motor à combustão interna muito semelhante a um motor de motocicletas, denominado *glow engine*. Enquanto os automóveis convencionais utilizam gasolina, etanol ou diesel como combustível. Nesses motores, o combustível *glow* é uma mistura de metanol, óleo e nitrometano.

Há dois tipos de motores *glow* disponíveis para o mercado de automodelismo e variam de acordo com a preferência do usuário. O motor *glow* 2 tempos é mais simples e mais barato e, geralmente, a categoria preferida para os iniciantes. Eles funcionam com base em uma vela incandescente que precisa ser aquecida para a partida do motor. Já o motor *glow* 4 tempos, a diferença está que ele funciona em 4 tempos, através de válvulas de admissão e exaustão.

Estes motores foram os mais utilizados durante o início do modelismo e segue até os dias atuais. O barulho desse motor traz mais realismo à experiência, além de possuírem mais força que os elétricos. No entanto, esses motores exigem uma regulagem com maior frequência, um tempo maior de preparação para ser colocado em campo e o combustível deve ser comprado em lojas especializadas e são vendidos normalmente em galões de 4L. Além disso, é importante citar que a vida útil desses motores não é tão alta. Geralmente, é necessário a troca de motor após a utilização de 8 galões de combustível.

2.2 PISTÕES PARA AUTOMODELOS À COMBUSTÃO

2.2.1 Introdução

Para compor os motores para automodelos, todos os componentes são miniaturizados, no entanto, alguns deles diferem, em geometria ou em material, para que seja garantido o bom funcionamento do carro radio controlado e, neste caso, podemos citar os pistões de motor. O pistão de um motor de um automóvel é um cilindro metálico que se movimenta dentro de outro cilindro chamado camisa. Ele é composto por uma cabeça, o qual se conecta a vela de ignição, e um corpo, no qual se fixa a biela. Eles são os responsáveis por converter a energia liberada durante o processo de combustão em trabalho mecânico e transferi-la como torque para o virabrequim, através do pino do pistão e da biela, como representado na Figura 2.

O funcionamento do pistão é dado, geralmente, em algumas etapas que variam de acordo com o motor, 2 ou 4 tempos. Analisando os motores 4 tempos, temos 4 etapas para que a energia seja convertida.

- Admissão: o pistão desce enquanto a válvula de admissão se abre e permite que a mistura de ar e combustível entre no cilindro.
- Compressão: a válvula de admissão se fecha, e o pistão sobe novamente no cilindro, comprimindo a mistura ar-combustível. A compressão aumenta a eficiência da queima quando a vela de ignição faz o disparo.
- Combustão: quando a mistura comprimida está no ponto ideal, a vela de ignição dispara uma centelha, provocando queima rápida do combustível. Isso gera uma grande pressão, empurrando o pistão com força para baixo.



Figura 2 – Representação esquemática de um pistão automotivo.

- Exaustão: o pistão sobe novamente, mas desta vez a válvula de escape se abre. Os gases resultantes da queima são expelidos para fora do cilindro.

Essa sequência de movimentos repetitivos é o que impulsiona o virabrequim conectado ao pistão e gerando, assim, a força motriz para o movimento do motor. É importante que a vedação desses cilindros sejam adequadas para que não haja vazamentos de compressão ou de gases de escape (VEDAMOTORS, 2023).

Nesses pistões, a vedação é feita pelos anéis, que são peças circulares que envolvem o corpo do pistão e impedem que a mistura ar e combustível ou os gases de combustão escapem, causando perda de pressão e potência. Além disso, eles também raspam o excesso de óleo lubrificante, evitando que ele entre na câmara de combustão e provoque fumaça ou carbonização. A lubrificação diminui o desgaste e o aquecimento das peças, auxiliando na refrigeração do pistão e evitando que o pistão sofra dilatação excessiva ou trincas por choque térmico (CRUZ, 2023).

No entanto, quando passamos a analisar os pistões de motores de automodelo, ele não possui os anéis de vedação, o que reflete em uma escolha mais cautelosa do material afim de minimizar as perdas devido à inexistência deste componente.

2.2.2 Propriedades, requisitos e materiais utilizados

Pistões em motores à combustão interna operam sob mudanças permanentes em sua temperatura e distribuição de tensões estruturais, devido a mudanças nas cargas externas do motor e na velocidade do motor. Os materiais do pistão, devem, portanto, ter propriedades adequadas não apenas à temperatura ambiente, mas também à temperatura operacional dos pistões. A temperatura máxima do pistão, presente na coroa, pode atingir 320-350°C, enquanto na parte inferior do pistão, a temperatura atinge um valor de 100-140°C. Na região dos anéis, a temperatura é dependente do óleo lubrificante e fica em torno de 230-240°C. Desta forma, infere-se que o pistão deve apresentar uma boa resistência a altas temperaturas, mantendo suas propriedades até 200°C. Caso a temperatura ultrapasse esses valores, o pistão deve ser,

imediatamente, resfriado. Esse grande gradiente de temperatura, gera altas tensões térmicas que se sobrepõem às tensões mecânicas.

A presença de alterações dimensionais permanentes nos pistões, devido ao aquecimento e resfriamento, conhecida como histerese, é um problema que precisa ser levado em consideração no processo de projeto dos pistões. O valor da histerese dos pistões pode ser limitado, principalmente pela seleção adequada da composição química dos pistões e pela seleção dos processos de fabricação (JANKOWSKI; KOWALSKI, 2017).

Antes de selecionar a composição química adequada, é preciso ter bem definido as principais propriedades que o pistão deve ter para garantir o bom funcionamento do motor.

A resistência mecânica é a principal propriedade desses pistões, no entanto, essa resistência deve ser mantida em altas temperaturas, garantindo uma boa dissipação de calor, além de resistir às pressões sem deformação. Porém, quando falamos sobre os pistões dos motores automodelo, a propriedade de dissipação de calor é ainda mais requisitada, uma vez que esses pistões não possuem os anéis de vedação que auxiliam na dissipação de calor e aumentam a durabilidade do pistão. Não podendo sofrer dilatação durante o funcionamento do motor.

Além disso, a massa do material utilizado impacta diretamente na velocidade nominal do motor e da carga do mecanismo de manivela, o que indica a necessidade de materiais mais leves.

Atualmente, após diversos testes nos pistões e em sua fabricação levaram à seleção de diferentes ligas de alumínio (Al), que são utilizadas na produção em massa de pistões. No entanto, na variação de projetos específicos, exigem a introdução de requisitos adicionais em que é necessário corrigir a composição química das ligas do pistão. As ligas de alumínio comumente utilizadas para pistões de motores à combustão são as ligas Al-Si, contendo em torno de 12% de Si, quase uma liga eutética. Os pistões de alumínio são leves e têm boas propriedades de condutividade térmica.

Essas ligas de Al são comumente utilizadas devido a alta resistência mecânica, uma vez que precisam suportar as cargas e as altas temperaturas durante o funcionamento do motor. Apresentam uma baixa densidade, que contribui para diminuir o peso dos pistões e impacta diretamente na eficiência do motor e na economia de combustível. Possuem boa condutividade térmica e elétrica, essenciais para a dissipação eficiente do calor gerado durante a combustão e da eletricidade estática, afim de manter a temperatura dos pistões dentro dos limites e evitar o superaquecimento do motor. Além disso, as ligas de alumínio utilizadas em pistões apresentam uma boa estabilidade dimensional, extremamente importante para que garanta o funcionamento do pistão mesmo em condições desfavoráveis. As ligas de Al hipereutética apresentam uma boa resistência à corrosão, à fadiga e são de fácil usinagem. No entanto, todas as propriedades mencionadas são dependentes da microestrutura das ligas de Al, do tamanho das dendritas formadas, da morfologia, tamanho e distribuição das fases primárias e das partículas de Si no microconstituente eutético (MILADINOVIC *et al.*, 2022).

Há também os pistões feitos em aço de alta resistência térmica, que mesmo com altas temperaturas, resistem a altas pressões de ignição. São pistões sujeitos a cargas elevadas e que devem apresentar tempos máximos de funcionamento e grande confiabilidade. Estes são utilizados em aplicações muito específicas, como motores de aeronaves, por exemplo. No entanto, devido à combinação de leveza e resistência mecânica que o alumínio possui, além da facilidade de fabricação, faz com que as ligas de alumínio sejam muito mais utilizadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL

3.1.1 Análise química

A amostra do pistão recebida do empresário (montador de carro automodelo à combustão) foi submetido à análise química via EDS (Espectroscopia de Energia dispersiva de raios X) da Oxford Instruments acoplado ao MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) FEG Quanta 400 que está no CCDM (Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais) localizado no DEMa (Departamento de Engenharia de Materiais) na UFSCar (Universidade Federal de São Carlos).

Além disso, o empresário também enviou uma análise química realizada no Instituto de Pesquisas e Estudos Industriais no Centro universitário da FEI em 28 de abril de 2015 e estes resultados serão colocados em anexo.

3.1.2 Microscopia ótica

Uma outra parte da amostra recebida foi cortada e submetida à análise por microscopia ótica. A Figura 3 apresenta a amostra e, na Figura 4, observa-se a seção transversal cortada e embutida.

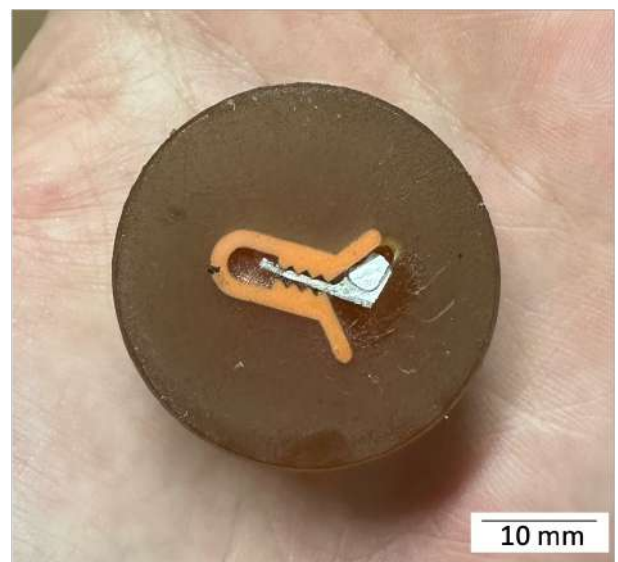


Figura 3 – Corte do pistão para carros automodelos à combustão recebida.

Figura 4 – Seção transversal da amostra embutida em resina polimérica termofixa.

A microestrutura dessa amostra foi analisada por MO (Microscopia ótica), sem ataque químico. Para esta análise, a amostra foi embutida à frio em resina polimérica termofixa. Após o processo de cura da resina, a amostra foi lixada sequencialmente por lixas de granulometria 120, 240, 320, 400, 600 e 1200 mesh, seguido de polimento com alumina em suspensão. Em seguida, a amostra foi analisada no microscópio OLYMPUS BX41M LED (Figura 5) localizado no laboratório de Análise Ótica do DEMa - UFSCar.



Figura 5 – Microscópio eletrônico disponível no laboratório utilizado neste trabalho.

3.2 SELEÇÃO DE MATERIAIS

A seleção de materiais para uso em pistões de automodelo foi realizada utilizando o software Ansys Granta EduPack versão 2020.

As principais propriedades citadas na revisão bibliográfica são utilizadas para fins de comparação para, em seguida, escolher o melhor material para tal aplicação. Inicialmente, a análise foi feita utilizando o nível 1 do software, onde as classes de materiais analisadas são mais gerais. Em seguida, aprofundamos a análise com o nível 2. Enfim, afim de aprofundar nas ligas que seriam utilizadas, o nível 3 é utilizado, do qual, iremos extrair as melhores ligas para fabricação de pistões.

Os dados são obtidos na forma de Diagramas de Ashby, que são mapas onde se representa uma propriedade e/ou característica contra a outra. Eles são construídos através da compilação de dados tabelados e apresentados na literatura na forma gráfica, afim de facilitar a visualização e identificação do material mais adequado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1.1 Análise química

Uma primeira análise química foi realizada no Instituto de Pesquisa e Estudos Industriais em 28 de abril de 2015 está presente no Anexo A.

A amostra submetida a análise química no CCDM via EDS tem seus resultados de composição global apresentados na Tabela 1. Foram realizados 4 medidas diferentes globais afim de tentar quantificar a composição química do pistão, no entanto, a mais destoante delas foi retirada da quantificação. Na Figura 6 observa-se a região rosa em que foi quantificada a medida 01 apresentada na tabela. As medições foram feitas em magnitudes de 1000x em diferentes regiões da amostra onde a microestrutura observada apresentava menos poros ou inclusões.

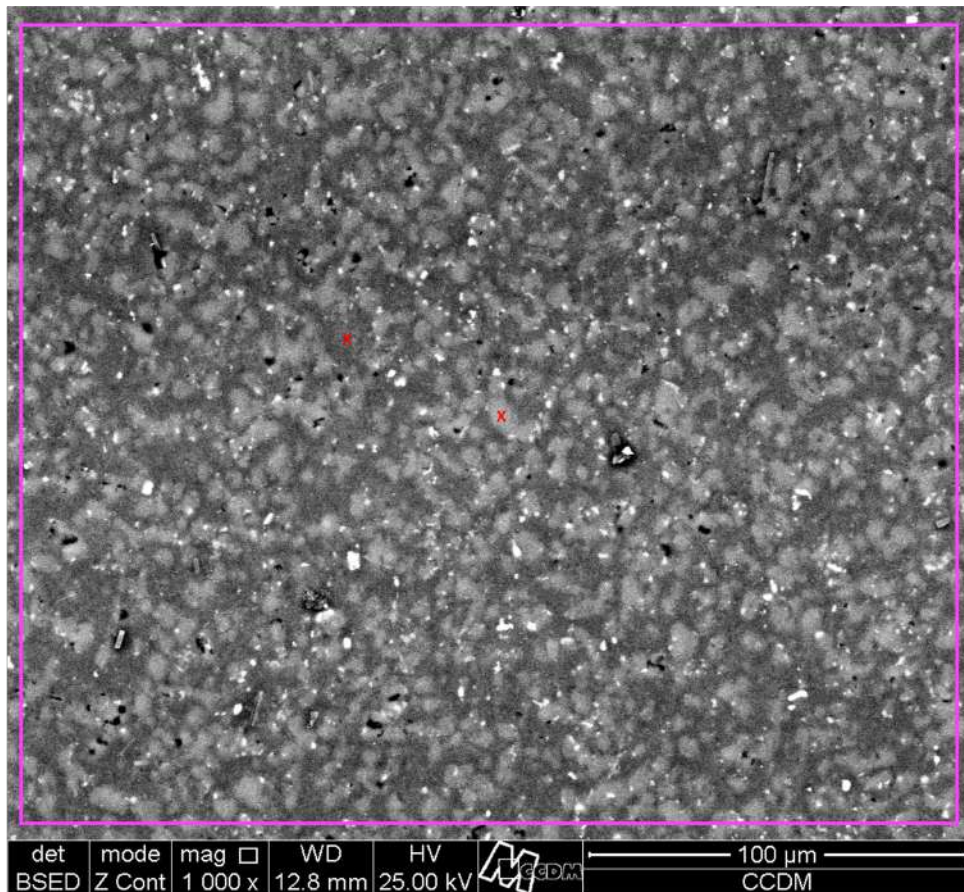


Figura 6 – Região e pontos quantificados por EDS da medida 01.

Tabela 1 – Composição química global da amostra obtida via EDS acoplado ao MEV.

Medida	Elemento (p.%)			
	Al	Si	Mg	Cu
01	54,95	43,04	0,89	1,11
02	54,48	43,59	0,89	1,04
03	55,17	42,72	0,84	1,27
Média	54,9 ± 0,4	43,1 ± 0,4	0,9 ± 0,1	1,1 ± 0,1

Como podemos observar na Tabela 1 e no espectro de EDS apresentado na Figura 7, a amostra estudada apresenta como elementos principais Al e Si, além da presença bem pequena de Mg e Cu,

resultando então em uma liga de alumínio-silício, com aproximadamente 43 p.% de Si. Assim, a partir dessa análise química, podemos concordar com o Capítulo 2 em que foi visto que, geralmente, os pistões automotivos são fabricados de ligas de alumínio-silício.

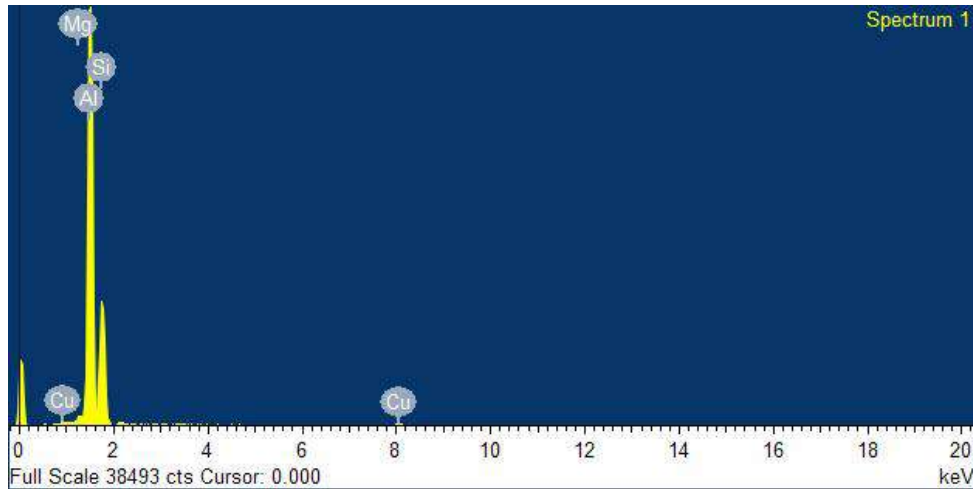


Figura 7 – Espectro de EDS da medida 01 realizada na amostra.

Na Figura 8, observa-se o diagrama de fases binário Al-Si. A partir dele, podemos inferir através da composição química obtida, em qual classificação esta liga se encontra. A depender da quantidade de silício presente, as ligas podem ser classificadas em hipo, hiper ou eutética. A partir do diagrama, têm-se que a composição eutética é 12,6 p.% Si. Para se ter ligas hipereutéticas, a composição mássica de silício na liga deve ser superior ao valor da composição eutética, enquanto para ter ligas hipoeutéticas, uma composição inferior a esse valor. Dessa forma, a liga encontrada é uma liga hipereutética.

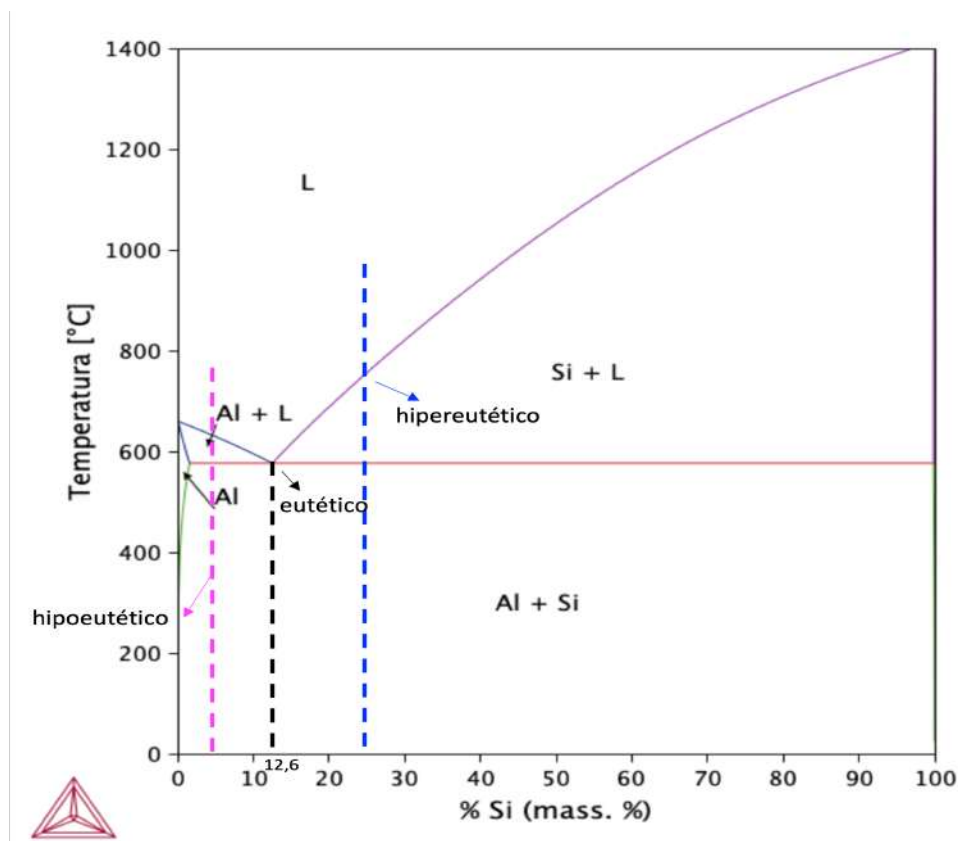


Figura 8 – Diagrama de fases Al-Si gerado pelo Thermo-Calc utilizando a base de dados TCBIN.

Além disso, a partir do diagrama, pode-se supor o caminho de solidificação e a microestrutura esperada da liga que será discutida na seção 4.1.2. Para facilitar o entendimento da microestrutura, medidas pontuais foram feitas afim de determinar a composição química de diferentes fases presentes. A Tabela 2 apresenta os valores obtidos e a Figura 6 apresenta dois pontos das fases clara e escura medidas na microestrutura. Observa-se na Tabela 2 que a fase clara apresenta composição majoritária de Si, em torno de 89,6%, em média 9,9% de Al e 0,2% e 0,3% de Mg e Cu, respectivamente. Quando passamos a analisar a fase escura, a composição química de diferentes medidas foram bem distintas, levando a um desvio padrão em torno de 20% tanto para o Si, quanto para o Al. Dessa forma, podemos dizer que a fase escura é uma mistura de Al e Si, ou seja, o microconstituente eutético, no entanto, a composição não condiz com a presença de 12,6 p.% de Si como é indicado pelo diagrama de fases e não foi possível a observação do microconstituente eutético no MEV.

Tabela 2 – Composição química pontual da amostra obtida via EDS acoplado ao MEV.

Elemento (p.%)				
Fase clara				
Medida	Al	Si	Mg	Cu
01	9,36	90,31	0,0	0,33
02	6,8	92,64	0,3	0,26
03	13,65	85,77	0,24	0,34
Média	9,9 ± 3,5	89,6 ± 3,5	0,2 ± 0,2	0,3 ± 0,0
Fase escura				
01	69,01	28,99	0,61	1,37
02	44,94	53,88	0,4	0,77
03	88,51	9,44	0,67	1,37
Média	67,5 ± 21,8	30,8 ± 22,3	0,6 ± 0,1	1,2 ± 0,3

4.1.2 Análise por microscopia ótica

Nesta seção, a amostra do pistão fornecida pelo empresário que serão comparadas com as micrografias apresentadas no *Metals Handbook* (VANDER VOORT *et al.*, 2004) e outros artigos para fins de comparação.

As Figuras 9 e 10 apresentam a micrografia desta amostra sem ataque químico. É possível observar uma micrografia bem refinada, com uma matriz cinza escura e pequenos grãos cinza claro.

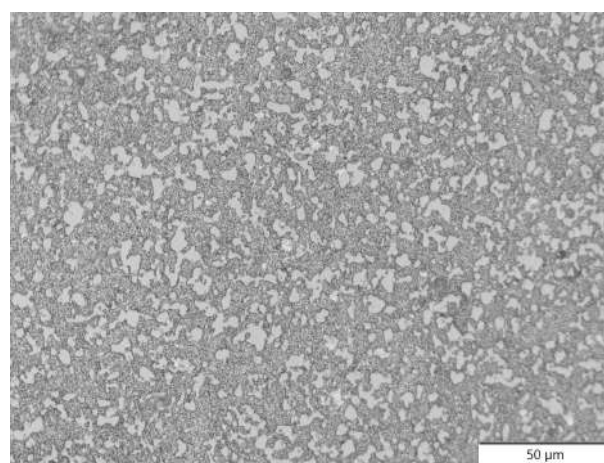
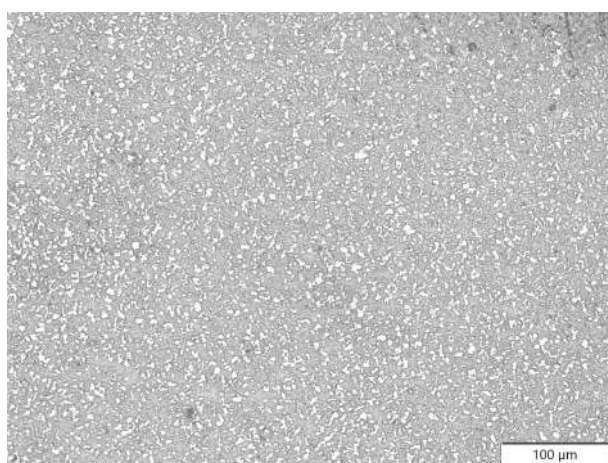


Figura 9 – Microscopia ótica da amostra do pistão, aumento de 200x. Figura 10 – Microscopia ótica da amostra do pistão, aumento de 500x.

Na Figura 11, observa-se uma microestrutura parecida, em termos de contraste de cor. Estas

microestruturas são apresentadas por Gan Jun-qi et al. que descrevem as fases presentes e avaliam a diferença de microestrutura com aumento do teor de Si (GAN *et al.*, 2020). A fase clara é o alumínio em solução sólida, enquanto a fase escura (cinza escuro) representa a matriz eutético de Al-Si. Dessa forma, poderíamos compará-las a microestrutura encontrada e dizermos que a fase clara presente na Figura 9 representa o Al em solução sólida, enquanto a fase escura, o microconstituente eutético. No entanto, como visto via EDS, temos a fase clara com composições muito elevadas em silício, em torno de 90 % de Si, enquanto a fase escura teve uma variação considerável de composição de Al e Si, o que induz a possibilidade de um microconstituente eutético. Além disso, a fração de fases presente na Figura 11 e da microestrutura estudada são visualmente bem distintas, o que também indica uma diferença de composição química e de processamento.

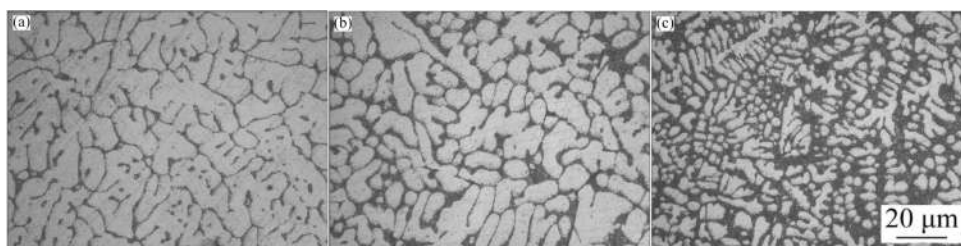


Figura 11 – Microestrutura dendrítica de ligas de alumínio modificadas com Sr, alumínio primário (cinza claro) e matriz eutética de alumínio-silício (cinza escuro), a) Al-3Si; b) Al-5Si e c) Al-7Si (GAN *et al.*, 2020).

Wang et. al (WANG *et al.*, 2019) faz uma análise microestrutural de ligas Al-Si hipereutéticas após diferentes tratamentos térmicos.

Durante a solidificação, em composições superiores à 12,6 p.% Si, temos a nucleação, primeiramente, de silício, e quando atinge-se temperaturas inferiores à 580°C, o microconstituente eutético é formado, composto das fases de alumínio e silício. Em composições iguais a 12,6 p.%, a microestrutura no equilíbrio é a eutética. Enfim, em composições inferiores à 12,6 p.%, têm-se ligas hipoeutéticas, com solidificação inicial de alumínio, seguido de formação do eutético em temperaturas inferiores à 580°C. No entanto, a microestrutura relatada é aquela obtida em condições de equilíbrio. Geralmente, ligas de alumínio são submetidas a diferentes tratamentos térmicos afim de obter a melhor microestrutura que dá a propriedade desejada para determinada aplicação.

Na literatura, o silício aparece como a fase cinza escura na microestrutura e em ligas hipereutéticas, temos a formação inicial do silício, seguido do eutético com o resfriamento do material. Na Figura 12 observa-se a microestrutura de diferentes composições hipereutéticas. Observa-se que com o aumento do teor de silício na liga, a fração e o tamanho da fase silício aumenta.

A partir dessas micrografias, poderíamos comparar a microestrutura obtida para a amostra analisada (Figuras 9 e 10). No entanto, no quesito de contraste de cor, não observamos coerência com a literatura, uma vez que teríamos o silício primário como fase clara e uma suposição de microconstituente eutético como cinza escuro.

Afim de tentar quantificar a fração de fases para supor a composição química deste pistão, um tratamento de imagens utilizando o software ImageJ através do contraste de cor foi feito para estimar a fração de fases e, em seguida, a regra da alavanca foi aplicada.

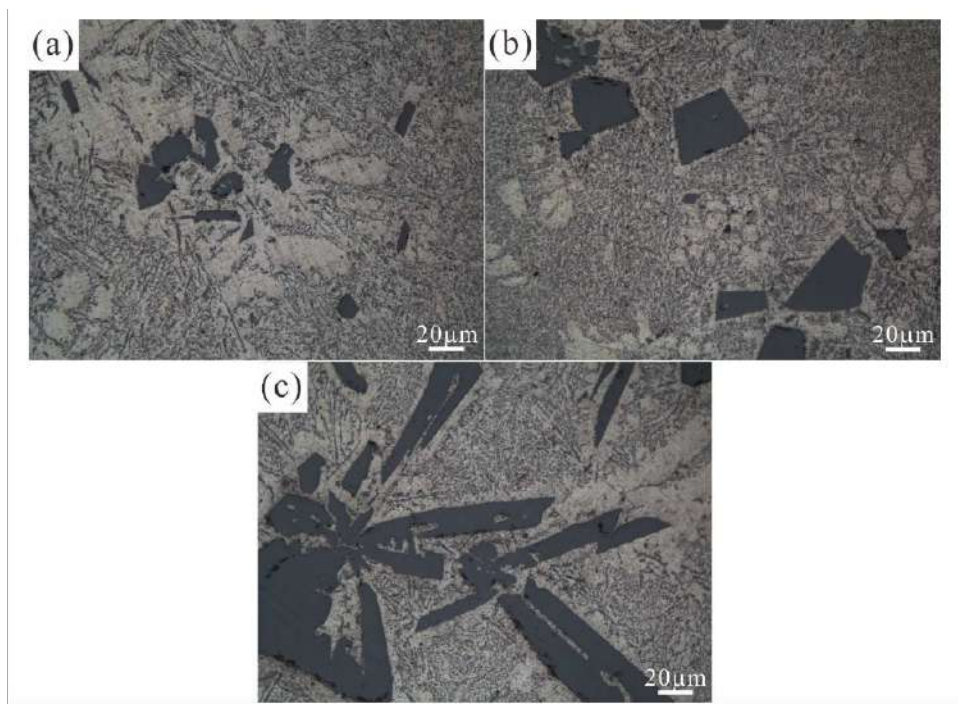


Figura 12 – Microestrutura das ligas hipereutéticas de Al-Si fundidas. a) AlSi16 b) AlSi21 e c) AlSi30 (WANG *et al.*, 2019).

As Figuras 13 e 14 apresentam a micrografia com contraste para exemplificar a região da imagem quantificada pela preenchimento em vermelho. Foram realizadas 6 medidas diferentes em diferentes regiões e os valores são apresentados na Tabela 3 abaixo. Após a aplicação da regra da alavanca no diagrama de fases apresentado (Figura 8), obteve-se uma fração de fase clara global de $41,9 \pm 1,1$ %, fase correspondente ao alumínio primário. Ao realizar os cálculos, obtém-se uma composição em torno de 8,2 p.% de Si para a micrografia em questão, o que corresponde a uma liga hipoeutética. Uma composição contradizente com aquela medida via EDS, o que indica que possivelmente a análise química não corresponde a micrografia observada.

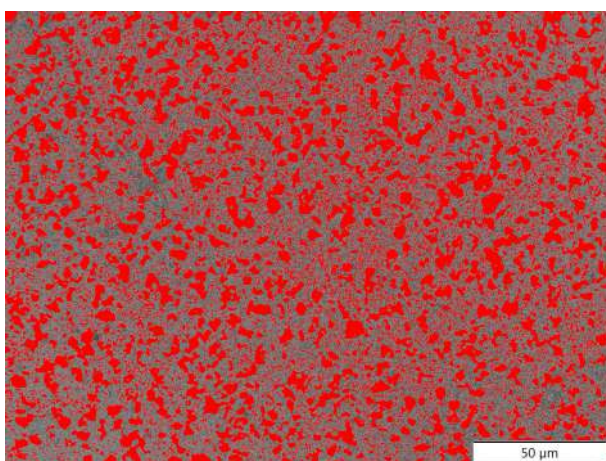


Figura 13 – Microestrutura com contraste preto e branco para quantificação de fase clara.

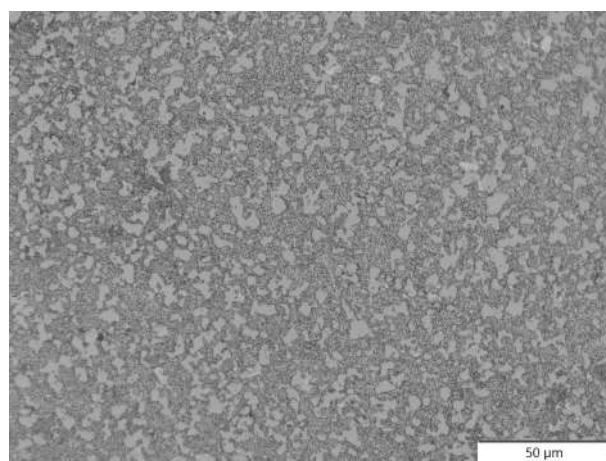


Figura 14 – Microestrutura original da amostra do pistão, aumento de 500x.

Tabela 3 – Porcentagem de fase clara na microestrutura apresentada na Figura 13

Medida	01	02	03	04	05	06	Média
% de fase clara	41,35	41,98	40,87	43,43	43,11	40,77	41,9 ± 1,1

Na Associação Brasileira de Normas técnicas, há uma única norma referente aos pistões de alumínio para motores de combustão interna. Nela, há uma variedade de composições químicas que estes pistões podem apresentar, no entanto, não apresentam composições de silício superiores a 19 p.%, o que indica que, possivelmente, mais uma vez, a análise química apresenta algum erro durante a quantificação desta amostra (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017). Além de, possivelmente, nesta amostra, ter sido realizado algum tratamento térmico que permitiu o refinamento da microestrutura e a mudança de morfologia do silício, como por exemplo, adicionando inoculantes no processo de fusão da liga. No entanto, questões de processamento não serão abordadas neste trabalho.

Após a análise por microscopia ótica, algumas medidas de dureza Vickers foram realizadas na amostra afim de ter uma visão geral de uma propriedade mecânica deste pistão. Os dados são apresentado na Tabela 4. Na norma NBR15905, é especificado a dureza mínima e máxima dos pistões de alumínio, entre 83 e 150HB. A conversão de dureza Vickers para Brinell é muito similar, em que, por exemplo, 152 HB corresponde a 160HV. Dessa forma, com uma dureza média de 132 ± 3 HV, têm-se que o pistão de automodelo apresenta-se dentro da norma de pistões de automóveis convencionais.

Tabela 4 – Medidas de dureza Vickers realizada no CCDM.

Medida	01	02	03	04	05	Média
Dureza (HV)	129	134	134	129	133	132 ± 3

O efeito do tratamento térmico de precipitação em ligas de alumínio é bastante estudado. Farokhpour et al. estudou o efeito da dureza e a evolução microestrutural em pistões de ligas de alumínio-silício após diferentes tratamentos térmicos de envelhecimento. A liga estudada apresenta uma composição química de Al-12Si-1,4Cu-0,8Mg-0,8Ni, o que a caracteriza como uma liga hipoeutética. Foram realizados 6 tratamentos térmicos diferentes em que foi obtido uma dureza máxima de 176 HB (~185 HV), uma dureza mínima de 141 HB (~150 HV) e um valor médio de dureza para essas ligas de 158 HB (~160 HV)(FAROKHPOUR; AGHAREB PARAST; AZADI, 2022). Zainon et al. também estudou o efeito do tratamento térmico de precipitação na dureza, microestrutura e resistência ao desgaste nas ligas de alumínio 332.0, com aproximadamente 11% de Si. A liga estudada apenas fundida apresentava uma dureza de 95 HV, enquanto após um tratamento de solubilização, a dureza aumentou para 107 HV e, enfim, após tratamento térmico de envelhecimento, atingiu uma dureza de 138 HV (ZAINON; RAFEZI AHMAD; DAUD, 2015).

As durezas de ligas geralmente são dadas de acordo com as proporções de cada fase presente. A fase de Si apresenta uma dureza em torno de 950 HV enquanto o Al varia entre 50-70 HV (ZENG *et al.*, 2020). Desta maneira, uma vez presente em torno de 10% de Si, seria esperado uma dureza em torno de 160 HV. Assim, a partir desses valores, se compararmos com a dureza da amostra obtida, o valor corresponde a uma composição próxima da composição eutética.

4.2 RESULTADOS DA SELEÇÃO DE MATERIAIS

Nesta seção, avançamos para a segunda parte deste trabalho. A seleção de materiais foi feita em três etapas. Uma primeira triagem foi feita utilizando o nível mais básico disponível no software, nível 1, onde foi identificado as grandes classes dos materiais em que será aprofundada a seleção quando avançamos para o nível 2 e 3 disponível no Ansys Granta Edupack.

4.2.1 Identificação da classe de material - nível 1

Nesta seção, iremos analisar os mapas de Ashby que relacionam as principais classes de materiais e algumas subclasses:

- Metais e suas ligas
- Cerâmicas
 - Técnicas
 - Não técnicas
 - Vidros
- Polímeros
 - Elastômeros
 - Materiais naturais
 - Espunja
- Compósitos

Neste nível, a base de dados reuni mais de 60 registros de materiais de engenharia comum. Os polímeros serão considerados o conjunto dos termoplásticos, termofixos, elastômeros, materiais naturais e as esponjas. A análise será feita em relação aos metais, cerâmicas técnicas e não técnicas, vidros, polímeros e compósitos. Foram feitas buscas de normas técnicas para pistões automotivos, afim de quantificar as propriedades que serão estudadas, no entanto elas não foram encontradas, apenas para anéis de pistão que não é o objetivo deste trabalho.

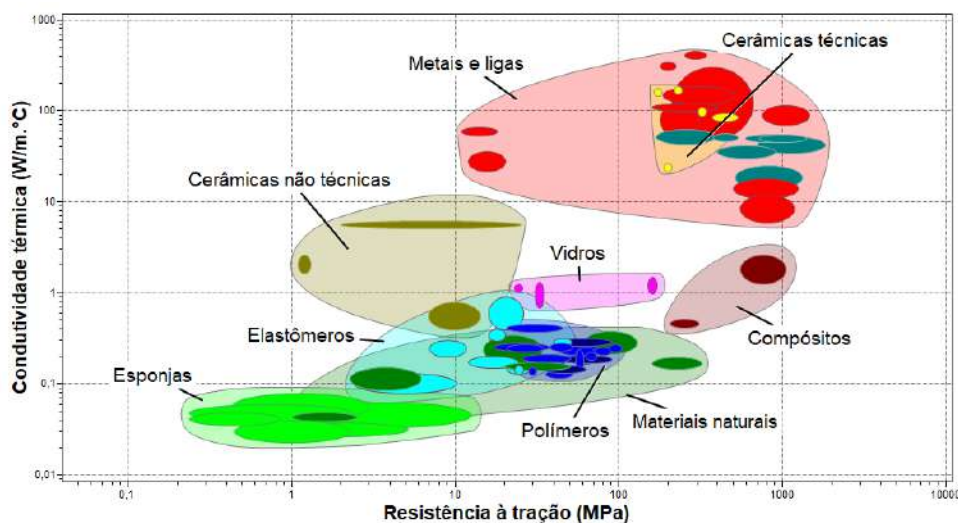


Figura 15 – Diagrama de Ashby - Condutividade térmica x Resistência à tração (nível 1).

A Figura 15 apresenta o diagrama de Ashby que relaciona a condutividade térmica e resistência à tração dos materiais. Os pistões precisam apresentar uma boa dissipação de calor, como comentado no Capítulo 2 e, para isso, é necessário que os materiais possuam uma boa condutividade térmica. No

entanto, devido à pressão sofrida nos pistões, alia-se também uma boa resistência mecânica afim de não deformá-los durante o funcionamento do motor.

Ao observarmos a Figura 15, é possível eliminar alguns materiais que possuem uma baixa condutividade térmica, são eles os polímeros em geral, os vidros, os compósitos e as cerâmicas não técnicas. Dessa forma, apresenta-se que os metais e suas ligas e as cerâmicas técnicas possuem um bom compromisso entre resistência mecânica e condutividade térmica.

A figura 16 apresenta o mapa de Ashby que relaciona a resistência à tração e a densidade do material. A densidade do pistão impacta diretamente a performance do motor, mais especificamente na velocidade que o carro automodelo pode atingir. É possível observar que, novamente, os polímeros estão no quadrante inferior do mapa, o que indica uma baixa densidade, que é importante para os pistões. No entanto, apresentam uma resistência à tração muito baixa, o que torna inviável sua aplicação. Neste caso, temos os compósitos com uma densidade pouco mais baixa que os metais e as cerâmicas técnicas, mas com uma boa resistência à tração. Apesar dos metais e as cerâmicas possuírem uma alta densidade em relação aos outros materiais, a resistência é um fator muito importante, o que indica que seria interessante selecionar o material dessas classes com a menor densidade possível.

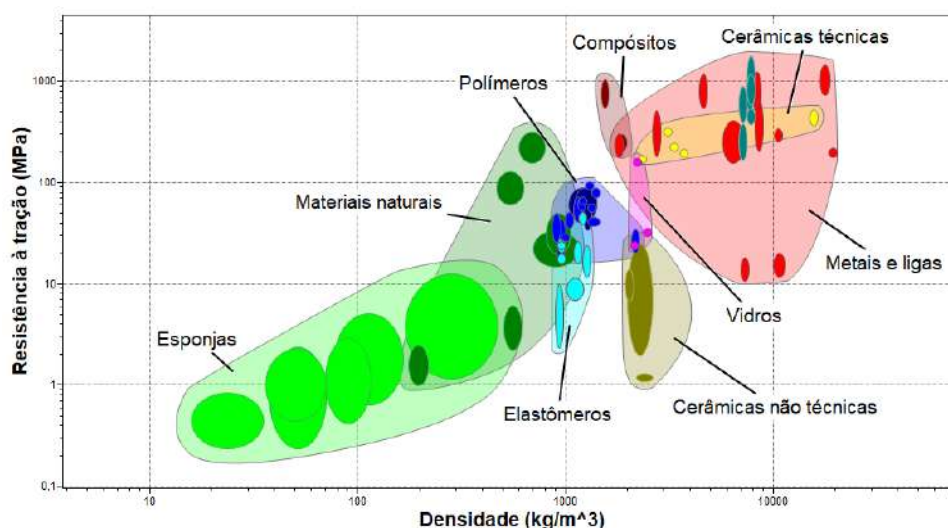


Figura 16 – Diagrama de Ashby - Resistência à tração x Densidade (nível 1).

Em seguida, precisamos analisar a performance dos materiais em altas temperaturas, acima de 100°C. Como mencionado no Capítulo 2, é necessário que o material mantenha suas propriedades na variação de temperatura que o pistão sofre durante o funcionamento do motor. Na Figura 17 observa-se as propriedades de densidade e temperatura máxima de serviço correlacionadas. Os polímeros possuem uma temperatura máxima entre 30°C à 200°C, já os metais e as cerâmicas possuem uma temperatura mais elevada de serviço, de 60°C até em torno de 1000°C para os metais e de 100°C até em torno de 2000°C para as cerâmicas. Mas quando relacionamos com a densidade, novamente, percebe-se que os metais e cerâmicas são mais densos, mas devido a necessidade de boas propriedades em altas temperaturas, busca-se selecionar os materiais dessas classes com a menor densidade possível.

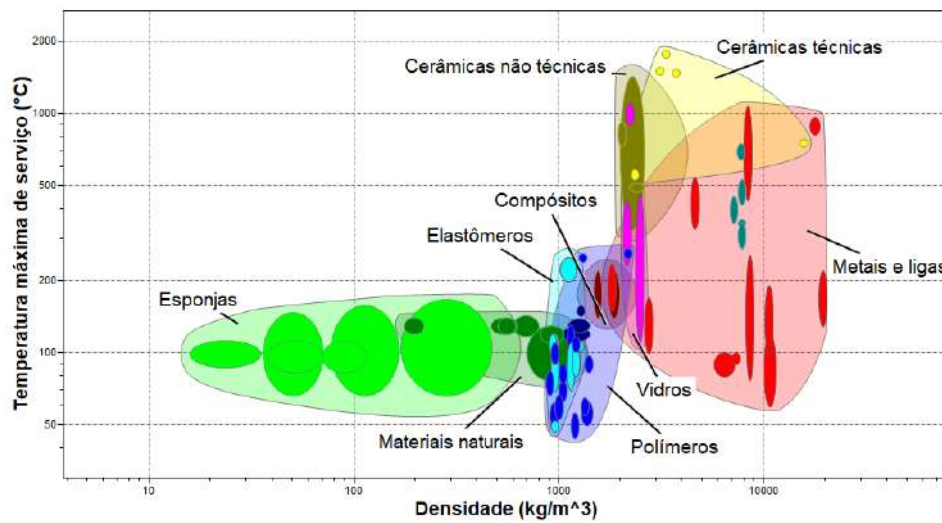


Figura 17 – Diagrama de Ashby - Temperatura máxima de serviço x Densidade (nível 1).

O pistão se encontra dentro da camisa, feita de aço, em que se movimenta em seu interior. Devido ao aumento da temperatura durante o funcionamento do motor, é importante que ele não sofra dilatações significativas para que não gere atrito entre o pistão e a camisa, levando até mesmo a um impedimento de movimento. Na Figura 18 observa-se o coeficiente de expansão térmica correlacionada com a densidade. Os menores coeficientes são dados pelas cerâmicas, metais, vidros e compositos. No entanto, a mesma análise para densidade é feita, e estes, são materiais mais densos, os quais devemos selecionar os menos densos dentro dessa classe.

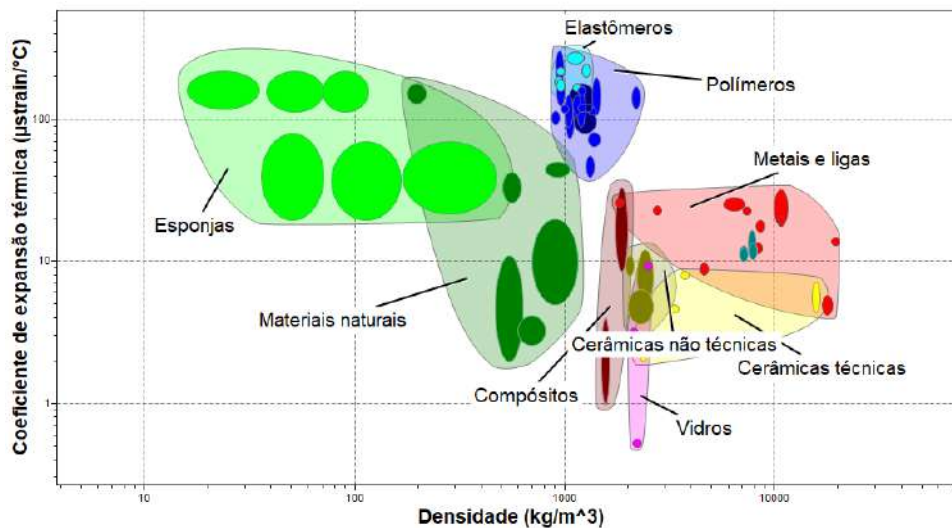


Figura 18 – Diagrama de Ashby - Coeficiente de expansão térmica x Densidade (nível 1).

A Tabela 5 apresenta as propriedades analisadas no nível 1 e são qualificadas em baixa, média e alta, indicando a região do diagrama do Ashby em que se encontra. No pistão automotivo para automodelo são necessários uma alta resistência mecânica, uma boa condutividade térmica, um baixo coeficiente de expansão térmica, uma resistência à altas temperaturas e uma baixa densidade. Observa-se na tabela que os metais possuem boa resistência à tração, boa condutividade térmica, temperatura máxima de serviço dentro da faixa de temperatura de 100°C à 200°C (média-alta), porém uma alta densidade. Dessa forma, durante esse trabalho buscaremos minimizar a densidade e o coeficiente de expansão térmica maximizando as outras propriedades. Analisando as cerâmicas, uma avaliação similar das propriedades é obtida, no entanto a condutividade térmica para as cerâmicas não técnicas é inferior, o que a elimina

de nossa seleção de materiais. Assim, para o próximo nível de análise com o software, descartaremos a análise dos materiais poliméricos e das cerâmicas não técnicas.

Tabela 5 – Comparação das propriedades dos materiais estudados no nível 1 do software Ansys Granta EduPack.

Propriedade	Materiais		
	Polímeros	Metais	Cerâmicas
Resistência à tração	Baixa	Alta	Alta
Densidade	Baixa	Alta	Média-Alta
Condutividade térmica	Baixa	Alta	Média
Expansão térmica	Alta	Média	Média-Baixa
Temperatura máxima de serviço	Baixa	Média-Alta	Alta

4.2.2 Identificação do grupo de material - nível 2

Quando avançamos para o nível 2 da seleção de materiais, a base de dados conta com, além das propriedades disponíveis no nível 1, propriedades ecológicas e de durabilidade. Uma vez que este não é o objetivo deste estudo, não analisaremos o nível 2.

4.2.3 Identificação do material a ser utilizado no pistão automodelo - nível 3

Ao avançar para o nível 3, mais de 3900 materiais de engenharia estão inclusos na base de dados, incluindo propriedades mecânicas, térmicas, elétricas e magnéticas. A partir dessa variedade de materiais, espera-se obter a liga mais adequada para aplicar nos pistões de automodelo.

Afim de manter a mesma ordem apresentada na seção 4.2.1, iniciamos a análise dos diagramas de Ashby por aquele que correlaciona a condutividade térmica do material e a resistência à tração. Além disso, como também comentado, a análise foi feita apenas para os materiais metálicos e as cerâmicas técnicas, os grupos selecionados no nível 1. O gráfico apresenta as classes principais de materiais e a diversas composições existentes.

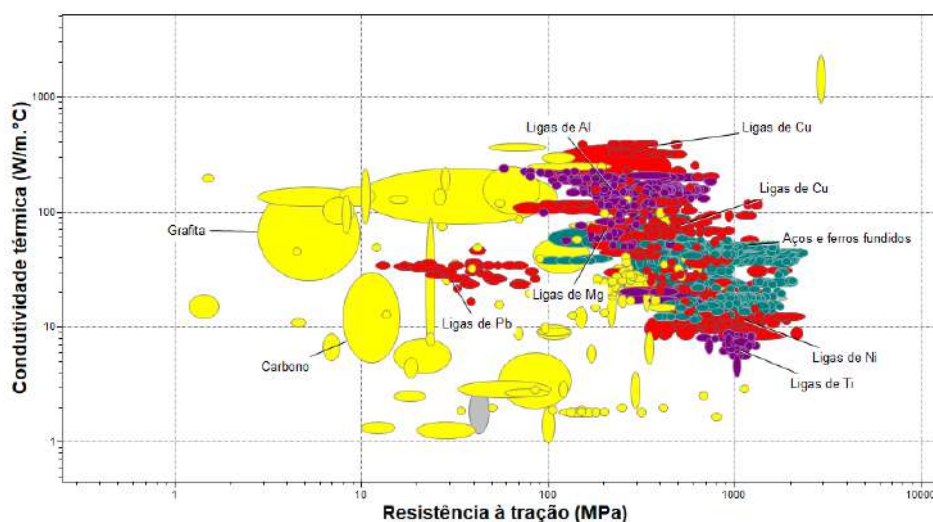


Figura 19 – Diagrama de Ashby - Condutividade térmica x Resistência à tração (nível 3).

A Figura 19 apresenta a condutividade térmica no eixo das ordenadas (eixo y) e a resistência à tração no eixo das abscissas (eixo x). Observa-se que entre os maiores valores de condutividade térmica, estão as ligas de Al, as ligas de Mg e as ligas de Cu. Além disso, essas ligas apresentam resistência mecânica intermediárias, que são suficientes para aplicação em pistões automotivos, uma vez que não precisam ser

altamente resistente, mas é preciso que suportem a solicitação durante o funcionamento do motor. Neste caso, apenas os materiais metálicos cumprem o requisito condutividade térmica exigido neste trabalho.

Continuando a análise de resistência à tração, a Figura 20 apresenta a resistência à tração correlacionada à densidade, uma propriedade importante quando se fala em velocidade dos carros automodelos à combustão. Ao avançarmos neste diagrama, as ligas de Cu selecionadas devido à boa condutividade térmica são eliminadas, uma vez que apresentam densidades bem maiores do que as apresentadas pelas ligas de Al e ligas de Mg. Novamente, as cerâmicas técnicas, em especial a grafita, apresenta uma baixa densidade, no entanto, apresenta valores de resistência que não satisfazem o necessário para os pistões.

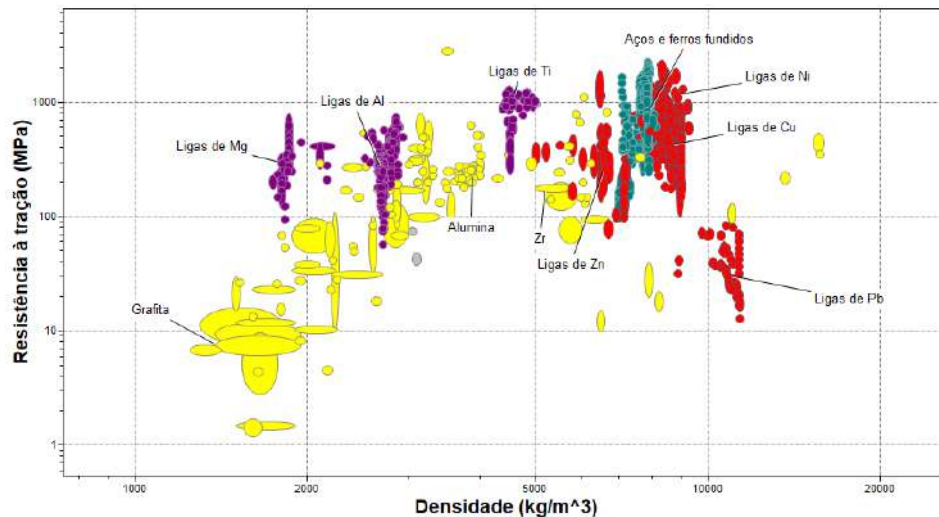


Figura 20 – Diagrama de Ashby - Resistência à tração x Densidade (nível 3).

Em seguida, mantemos a presença da densidade no diagrama de Ashby, e trocamos a resistência pela temperatura máxima de serviço (Figura 21). Neste gráfico, observamos que as cerâmicas técnicas apresentam os maiores valores de temperatura máxima em serviço, o que era esperado, no entanto, não precisamos de materiais que resistam até 2000°C. Assim, observando os materiais metálicos com menores valores de densidade e temperaturas de serviço entre 100°C e 200°C, temos algumas ligas de Mg, algumas ligas de Al e as ligas de Ti.

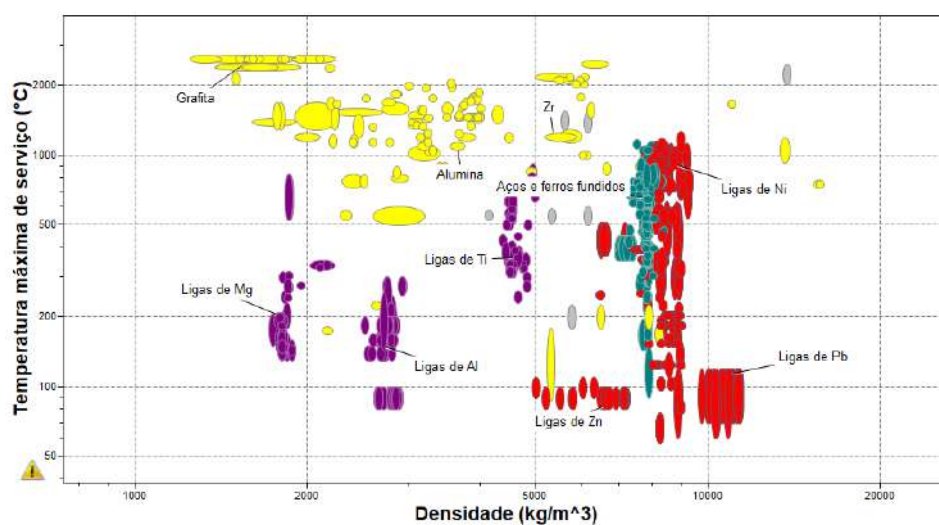


Figura 21 – Diagrama de Ashby - Temperatura máxima de serviço x Densidade (nível 3).

A figura 22 apresenta o diagrama de Ashby que correlaciona o coeficiente de expansão térmica

e a densidade. Observa-se que há uma grande variedade de materiais para cada grupo apresentado. Em baixas densidades e baixo coeficiente de expansão térmica, têm-se a grafita e a alumina. Analisando-se os materiais metálicos, as ligas de Mg e Al apresentam menor densidade, porém um coeficiente de expansão térmica um pouco mais alto. Em contrapartida, as ligas de Ti apresentam menor coeficiente, mas uma densidade maior.

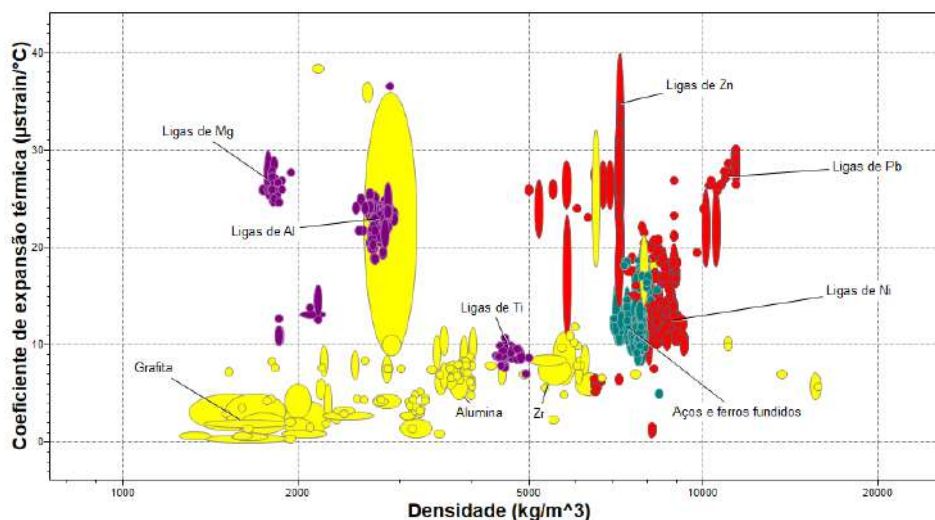


Figura 22 – Diagrama de Ashby - Coeficiente de expansão térmica x Densidade (nível 3).

Seguindo o mesmo raciocínio utilizado no nível 1, a Tabela 6 apresenta as propriedades estudadas e os principais elementos discutidos acima são qualificados em baixa, média e alta, indicando a região do diagrama em que se encontra. Relembrando, buscamos por alta resistência mecânica, uma boa condutividade térmica, um baixo coeficiente de expansão térmica, uma resistência à altas temperaturas e uma baixa densidade. Dessa forma, buscaremos minimizar a densidade e o coeficiente de expansão térmica e maximizar as demais propriedades. Neste caso, observa-se que as cerâmicas são eliminadas de nossa seleção de materiais, uma vez que possui tanto a resistência à tração quanto a condutividade térmica baixas. Tendo em vista que buscamos minimizar a densidade, as ligas de Cu e de Ti são eliminadas também de nossa seleção. Enfim, quando observamos os dois materiais restantes, ligas de Al e ligas de Mg, as ligas de Mg apresentam coeficiente de expansão térmica médios-altos e uma condutividade térmica média, destoando do alumínio, que apresenta alta condutividade térmica e coeficiente de expansão térmica mediano. Assim, exploraremos as ligas de Al afim de selecionar a melhor composição para os pistões para automodelos à combustão.

Tabela 6 – Comparação das propriedades dos materiais estudados no nível 2 do software Ansys Granta EduPack.

Propriedade	Materiais				
	Metais				Cerâmicas
	Ligas de Al	Ligas de Mg	Ligas de Ti	Ligas de Cu	Grafita
Resistência à tração	Alta	Alta	Alta	Alta	Baixa
Densidade	Baixa-Média	Baixa	Média	Alta	Baixa
Condutividade térmica	Alta	Média	Baixa	Alta	Baixa
Expansão térmica	Média	Média-Alta	Baixa	Baixa	Baixa
Temperatura máxima em serviço	Média	Média	Média-Alta	Média-Alta	Alta

4.2.3.1 Seleção de ligas de alumínio

Nesta seção, analisaremos as ligas de alumínio disponíveis no software afim de determinar a melhor composição para os pistões para automodelos à combustão.

Antes de apresentar os mapas de Ashby com algumas ligas de alumínio, é importante saber como é feita a classificação dessas ligas de acordo com a sua composição para facilitar a leitura do gráfico. As ligas de alumínio são comumente utilizadas no lugar do alumínio puro afim de otimizar algumas propriedades. O alumínio puro tem uma baixa resistência mecânica, em contrapartida, apresenta uma boa condutividade, resistência à corrosão, baixa densidade e uma boa plasticidade. A classificação das ligas são diferentes de acordo com a fabricação, sendo divididas em ligas de trabalho mecânico e ligas de fundição. As ligas de trabalho mecânico, são definidas em 4 números e o primeiro deles descreve o principal elemento de liga presente (SCHWARZ, 2019). Desta maneira, temos:

- 1XXX - Ligas com 99% de pureza de alumínio.
- 2XXX - Ligas de alumínio com cobre.
- 3XXX - Ligas de alumínio com manganês.
- 4XXX - Ligas de alumínio com silício.
- 5XXX - Ligas de alumínio com magnésio.
- 6XXX - Ligas de alumínio com magnésio e silício.
- 7XXX - Ligas de alumínio com zinco.
- 8XXX - Outros elementos.

Já para as ligas de fundição, a classificação é feita da seguinte maneira:

- 1XX.X - Ligas com 99% de pureza de alumínio.
- 2XX.X - Ligas de alumínio com cobre.
- 3XX.X - Ligas de alumínio com silício e cobre ou manganês.
- 4XX.X - Ligas de alumínio com silício.
- 5XX.X - Ligas de alumínio com magnésio.
- 7XX.X - Ligas de alumínio com zinco.
- 8XX.X - Ligas de alumínio com estanho.

Além dessas classificações, letras ou números a mais são denominados sufixos e definem a condição final da liga, especialmente os tratamentos térmicos. No entanto, não é foco deste trabalho e essa nomenclatura não será detalhada.

É possível observar que há uma grande variedade de ligas disponíveis. Afim de selecionar da melhor maneira a composição da liga, a busca por normas técnicas e patentes foram feitas, no entanto, as normas de pistões automotivos convencionais não podem ser completamente aplicadas no nosso trabalho, uma vez que a solicitação do motor é diferente e, além disso, as principais normas relacionam os anéis do pistão, componente inexistente em pistões de carros automodelos à combustão. Mas, apesar da diferença de solicitação, valores como faixa de dureza e resistência a tração mínima serão considerados.

Tabela 7 – Valores de condutividade térmica de alguns metais (NOBRE, 2023).

Material	Condutividade térmica (W/m.°C)
Cobre	397
Alumínio	226
Magnésio	151
Zinco	112
Ferro	72

A Figura 23 apresenta o diagrama de Ashby de condutividade térmica e resistência à tração apenas para as ligas de alumínio. Uma vez que não temos dados quantitativos de condutividade térmica e resistência à tração específicos para automodelos à combustão para compararmos os valores apresentados no diagrama, algumas ligas foram selecionadas com uma resistência mecânica superior a 150 MPa, valor indicado pela norma para pistões automotivos de ligas de alumínio para motores de combustão interna ABNT NBR 15905 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017). Quando analisamos a condutividade térmica do material, os valores ficam em torno de 100 e 250 W/m.°C que são valores relativamente alto quando comparamos com alguns outros metais, como apresentado na Tabela 7. Desta forma, escolher a liga de alumínio com maior ou menor condutividade térmica não é necessário, uma vez que, em geral, todas as ligas apresentam um alto valor de condutividade térmica.

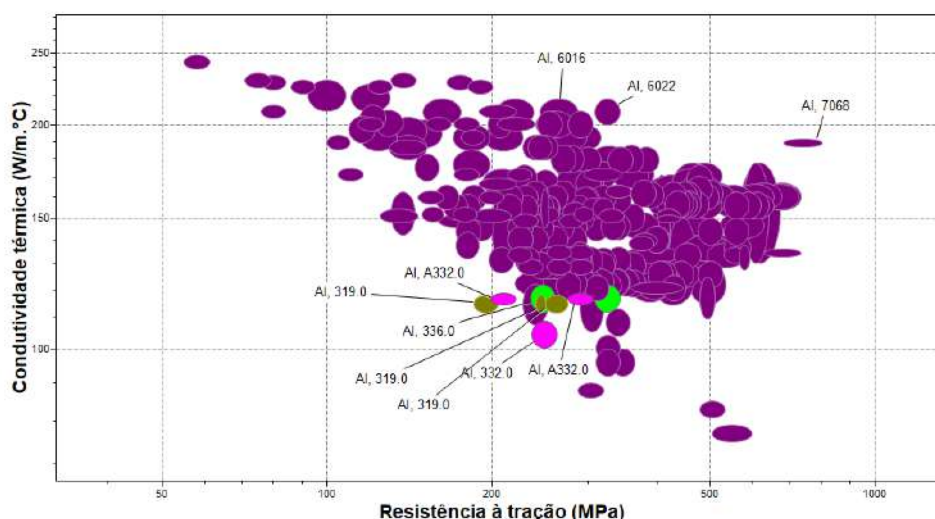


Figura 23 – Diagrama de Ashby - Condutividade térmica x Resistência à tração (ligas de Al - nível 3).

Avançando a análise correlacionando a resistência à tração e a densidade, as mesmas ligas identificadas no diagrama anterior são apresentadas na Figura 24. Novamente, estão inseridas em uma resistência superior a 150 MPa e uma densidade em torno de 2700 kg/m^3 . Desta maneira, afim de obter uma menor densidade, eliminamos as ligas que apresentam densidades superiores a 2800 kg/m^3 . Assim, as ligas Al A319.0 não serão analisadas em próximos diagramas. Além disso, as ligas selecionadas tem sua classificação iniciada por 3XX.X, o que indica serem ligas com silício e cobre ou manganês.

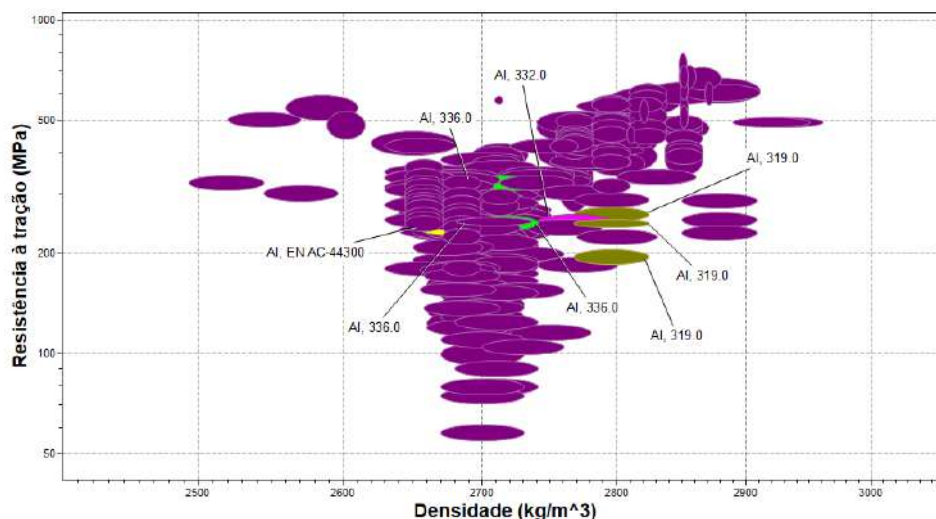


Figura 24 – Diagrama de Ashby - Resistência à tração x Densidade (ligas de Al - nível 3).

Para garantir o bom funcionamento dos pistões, é preciso que apresentem um boa resistência a altas temperaturas. Dessa forma, as ligas a serem selecionadas são aquelas que possuem um temperatura máxima de serviço em torno de 200°C, como enfatizado em seções anteriores. Na Figura 25 temos o mapa de Ashby para a temperatura máxima de serviço e a densidade. As ligas Al A332.0 e Al A336.0 identificadas no diagrama anterior aparecem novamente e com propriedades na gama de temperatura desejada. Todas as ligas com temperaturas abaixo de 150°C são eliminadas. Já as ligas que apresentam maiores temperaturas de serviço, acima de 250°C, possuem uma densidade mais elevada que também são excluídas de nossa seleção.

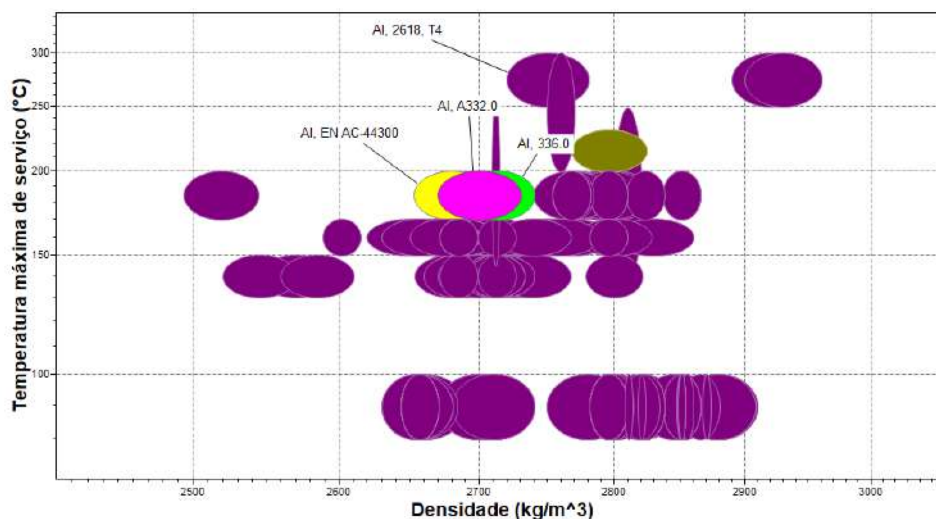


Figura 25 – Diagrama de Ashby - Temperatura máxima de serviço x Densidade (ligas de Al - nível 3).

Enfim, a última propriedade que estamos analisando é apresentada na Figura 26. O requisito mais importante desses pistões são que eles não devem sofrer dilatação térmica uma vez que eles não possuem os anéis em seu entorno, como em pistões convencionais, que auxiliam na dissipação de calor e evitam que os pistões se dilatam, garantido uma boa movimentação dentro da camisa. Dessa forma, no caso dos pistões para automodelo, devemos selecionar as composições que apresentam os menores coeficientes de expansão térmica. No diagrama de Ashby que relaciona esta propriedade e a densidade, observa-se que as ligas que apresentam o menor coeficiente com as menores densidades são as ligas Al A322.0 e Al A336.0.

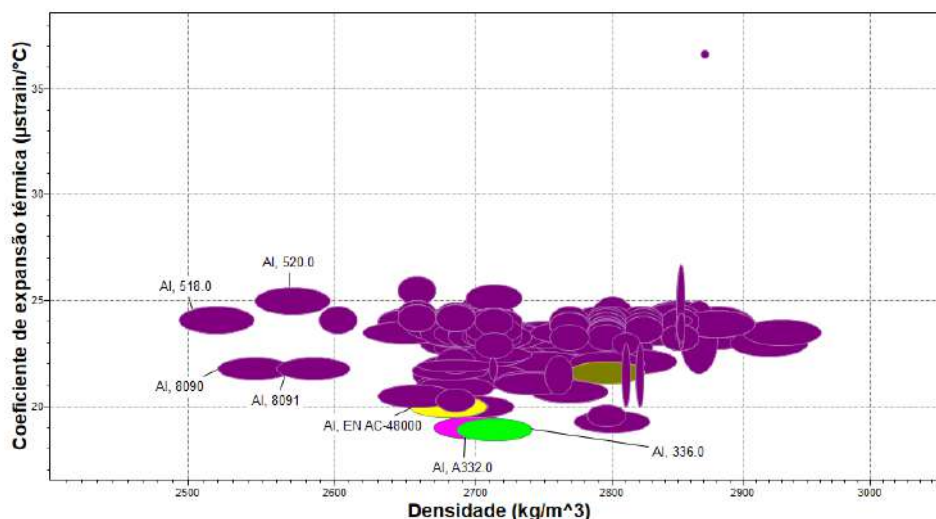


Figura 26 – Diagrama de Ashby - Coeficiente expansão térmica x Densidade (ligas de Al - nível 3).

As ligas de alumínio da série 300.0 fundidas apresentam em sua composição o silício e cobre ou manganês como principais elementos. A liga Al A332.0 e Al A336.0 tem sua composição muito parecida e apresentada na Tabela 8. Ao observarmos a Tabela, identificamos que a liga A332.0 é uma liga hipoeutética, enquanto a liga A336.0 apresenta uma gama de composições de região hipo, hiper e eutética do diagrama de fases Al-Si. Em termos de propriedades mecânicas, as duas ligas apresentam uma resistência em torno de 200 MPa e dureza Vickers em torno de 120 HV. Requisitos que cumprem com a norma utilizada como referência neste trabalho. A densidade também é similar, aumentando de 2,72 g/cm³ para 2,76 g/cm³ da liga A332.0 para A336.0, uma diferença desprezível.

Tabela 8 – Composição química das ligas de alumínio selecionadas.

Liga	Al	Cu	Fe	Mg	Mn
A3320	80,1 - 88,7 p.%	2,0 - 4,0 %	<= 1,2 %	0,5 - 1,5 %	<= 0,35 %
A3360	79 - 85,8 p.%	0,5 - 1,5 %	<= 1,2 %	0,7 - 1,3 %	<= 0,35 %
	Ni	Si	Ti	Zn	Outros
A3320	<= 0,5 %	8,8 - 10,5 %	<= 0,25 %	<= 1,0 %	<= 0,05 %
A3360	2 - 3 %	11 - 13 %	<= 0,25 %	<= 0,35 %	<= 0,05 %

Em termos de perda de propriedades com o aumento da temperatura, na Figura 27 podemos observar a diminuição do limite de elasticidade com o aumento da temperatura da liga A336.0. No entanto, ele é mais significativo acima de 200°C o que indica que ele mantém bem suas propriedades na temperatura que estamos buscando. Para temperaturas mais altas, o pistão deve ser resfriado.

Enfim, a seleção de ligas mais adequadas para aplicações de pistões para automodelos à combustão são A332.0 e A336.0, ligas de fundição similares que apresentam tanto composições eutética quanto hipo e hipereutéticas. Mas vale ressaltar, que as composições hipo e hiper são bem próximas da eutética, diferente da composição observada na amostra recebida, em que o teor de silício é bem significativo e apesar do alto teor de silício, a dureza, encontra-se na mesma faixa das ligas selecionadas. Além disso, os mesmos elementos de liga principais selecionados na seleção de materiais estão presentes na amostra analisada, o que indica

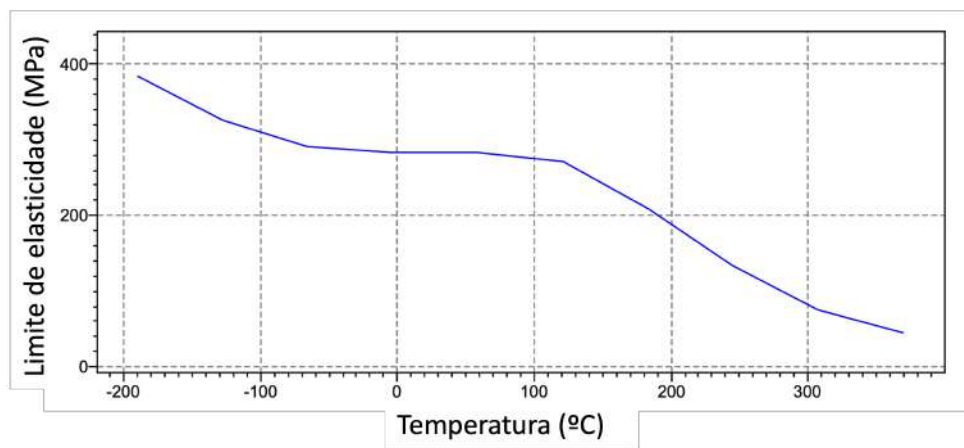


Figura 27 – Gráfico do limite de elasticidade x temperatura para a liga A336.0 (GRANTA EDUPACK..., 2020).

5 CONCLUSÃO

A amostra recebida foi submetida a análise química e de microscopia ótica, além da realização de uma seleção de materiais via Granta EduPack. Por meio dos resultados obtidos, conclui-se que:

1. O pistão de automodelo a combustão analisado é uma liga de Al-Si, além de elementos de liga como Mg e Cu, que as caracterizam ligas endurecíveis por precipitação.
2. A microestrutura analisada apresenta semelhança com microestruturas apresentadas na literatura, o que indica ser uma liga hipoeutética. Devido ao refinamento da microestrutura, possivelmente algum tratamento térmico e/ou adição de inoculantes/modificadores de eutético/refinadores foi realizado.
3. A seleção de materiais, utilizando as propriedades de resistência mecânica, condutividade térmica, expansão térmica, temperatura máxima em serviço e densidade, também indica ligas de alumínio como as mais apropriadas para esta aplicação, mais especificamente as ligas da série 3XX.X.
4. A liga de alumínio com Si, Mg e Cu é a mais adequada para aplicação em pistões automotivos, tanto convencionais quanto automodelo. Porém, visto a falta de normas e patentes, não é possível comparar valores de propriedades que indicam qual é a composição de silício mais adequada.
5. A partir dos valores de dureza da literatura, têm-se que ligas com teor de silício em torno de 12 %, próxima a composição eutética, apresentam valores de dureza em torno de 150 HV e dentro da norma existente. Foi obtido um valor de dureza coerente para a amostra estudada, 132 HV.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Motores de combustão interna de ignição por centelha — Pistões monolíticos de liga leve de alumínio**. [S.l.: s.n.], 2017. ABNT NBR 15905. Norma Técnica.
- CRUZ, Leonardo. **Pistão do Motor: Qual a Sua Função e Importância?** Acesso em: 31/10/2023. 2023. Disponível em: <https://www.minutoseguros.com.br/blog/pistao-do-motor-funcao-importancia/>.
- FAROKHPOUR, Mehrnaz; AGHAREB PARAST, Mohammad Sadegh; AZADI, Mohammad. Evaluation of hardness and microstructural features in piston aluminum-silicon alloys after different ageing heat treatments. **Results in Materials**, Elsevier B.V., v. 16, dez. 2022. ISSN 2590048X.
- GAN, Jun qi; HUANG, Yu jian; WEN, Cheng; DU, Jun. Effect of Sr modification on microstructure and thermal conductivity of hypoeutectic AlSi alloys. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)**, Nonferrous Metals Society of China, v. 30, n. 11, p. 2879–2890, nov. 2020. ISSN 22103384.
- GRANTA DESIGN LTD. **Granta EduPack**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.grantadesign.com/>.
- HOBBIES, Lima. **O que é automodelismo?** Acesso em: 01/11/2023. 2019. Disponível em: <https://www.limahobbies.com.br/o-que-e-automodelismo#:~:text=Os%20modelos%20dos%20carros%20s%C3%A3o,%2F8%20e%201%2F10..>
- JANKOWSKI, Antoni; KOWALSKI, Mirosław. **607-DESIGN OF A NEW ALLOY FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES PISTONS**. [S.l.: s.n.], 2017. P. 11–15.
- MILADINOVIC, Slavica; STOJANOVIĆ, Blaža; GAJEVIĆ, Sandra; IVANOVIĆ, Lozica; SKULIĆ, Aleksandar. A review of hypereutectic aluminum piston materials. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, IOP Publishing, v. 1271, n. 1, p. 012011, dez. 2022. ISSN 1757-8981.
- NOBRE, Aços. **Condutividade Térmica: O que é, Importância e Principais Materiais**. [S.l.: s.n.], 2023. <https://acosnobre.com.br/blog/condutividade-termica/>. Acesso em: 12/11/2023.
- SCHWARZ. **Conheça as Ligas de Alumínio**. Acesso em: 12/11/2023. 2019. Disponível em: <https://www.schwarz.com.br/blog-conheca-as-ligas-de-aluminio/>.
- VANDER VOORT, George F. *et al.* **ASM Handbook - Volume 9: Metallography and Microstructures**. 10th. Materials Park, OH, USA: ASM International, 2004. ISBN 978-0-87170-707-9.
- VEDAMOTORS. **Qual o papel do pistão do motor nas motocicletas?** Acesso em: 31/10/2023. 2023. Disponível em: <https://vedamotors.com.br/pistao-do-motor-motocicleta/>.

WANG, J.; YANG, W.; WU, C.; TU, H.; SU, X. Microstructure and mechanical properties of hypereutectic aluminium-silicon alloy annealing at liquid-solid region. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, Wiley-VCH Verlag, v. 50, n. 12, p. 1503–1510, dez. 2019. ISSN 15214052.

ZAINON, Fizam; RAFEZI AHMAD, Khairul; DAUD, Ruslizam. Effect of Heat Treatment on Microstructure, Hardness and Wear of Aluminum Alloy 332. **Applied Mechanics and Materials**, Trans Tech Publications, Ltd., v. 786, p. 18–22, ago. 2015.

ZENG, Jie; ZHU, Chenyang; WANG, Wanlin; LI, Xia; LI, Hualong. Evolution of primary Si phase, surface roughness and mechanical properties of hypereutectic Al–Si alloys with different Si contents and cooling rates. **Philosophical Magazine Letters**, Taylor e Francis Ltd., v. 100, n. 12, p. 581–587, dez. 2020. ISSN 13623036.

Anexos

ANEXO A – Análise química

Uma primeira análise química foi realizada no Instituto de Pesquisa e Estudos Industriais em 28 de abril de 2015 e o empresário enviou os resultados, que estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Composição química realizada pelo Instituto de Pesquisas e Estudos Industriais em 28 de abril de 2015.

Elemento	Si	Mn	Co	W	Ni	Mo	Fe	Cu	Mg	Ag
p. %	25,20	0,62	1,80	1,41	1,32	0,14	0,20	2,70	0,67	1,09

Através desta tabela, observa-se a presença de 25% p. de Si, o que é caracterizado como uma liga hipereutética quando aproximamos a análise do diagrama binário Al-Si mesmo sabendo que há a presença de outros elementos de liga. Além disso, observa-se a presença de elementos como Co, W e Ag em alto teor quando comparado a presença de Mn, que é um elemento comumente encontrado nas ligas de Al-Si aplicada em pistões automotivos. No entanto, esta composição química não corresponde a microestrutura observada no microscópio ótico. O que indica haver algum erro com essa medida.