

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ANÁLISE DE FALHAS EM PISTÃO DE MOTOR À  
COMBUSTÃO 4 TEMPOS TURBO**

**DANIEL MITSUMASSA RAMA SATO**

**SÃO CARLOS -SP**

**2024**

# **ANÁLISE DE FALHAS EM PISTÃO DE MOTOR À COMBUSTÃO 4 TEMPOS TURBO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Piter Gargarella

Co-Orientador: Me. Rafael Simon

São Carlos-SP

2024



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

**NOME:** Daniel Mitsumassa Rama Sato

**RA:** 727371

**TÍTULO:** Análise de falhas em pistões de motor à combustão 4 tempos turbo

**ORIENTADOR(A):** Prof. Dr. Piter Gargarella

**CO-ORIENTADOR(A):** Me. Rafael Wagner Simon


**DATA/HORÁRIO:** 31/01/2024, 17h

### BANCA – NOTAS:


	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Piter Gargarella	10	10
Prof. Dr. Claudemiro Bolfarini	10	10
<b>Média</b>	10	10

### BANCA – ASSINATURAS:

Prof. Dr. Piter Gargarella

Documento assinado digitalmente  
 **PITER GARGARELLA**  
Data: 04/02/2024 11:34:37-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Claudemiro Bolfarini

Documento assinado digitalmente  
 **CLAUDEMIRO BOLFARINI**  
Data: 04/02/2024 11:58:24-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

## **DEDICATÓRIA**

Gostaria de dedicar este trabalho à minha companheira Giovana, parceira e amiga de todos os momentos.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço ao Prof. Dr. Piter Gargarela por me orientar nesta etapa final de meu curso, ao Mestre Rafael Wagner Simon, pela orientação ao longo dos anos em que trabalhei no Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (CCDM) e ao longo deste trabalho, assim como à toda a equipe do CCDM, por fornecer à estrutura necessária ao desenvolvimento do mesmo e à equipe do Laboratório de Solidificação que me auxiliou com o desenvolvimento das simulações presentes neste trabalho. Por fim, agradeço à toda a equipe Fórmula Route UFSCar pelos anos de aprendizado, amizades e oportunidades, dentre elas a de fornecer o material para este estudo de caso.

“Really, you should Always discuss the defeats because you can learn much more from failure than from success.”

Niki Lauda

## RESUMO

Com o mercado de turbocompressores automotivos experimentando um aumento significativo devido à redução dos limites de emissão de  $CO_2$  e à crescente demanda por veículos de alto desempenho, prevê-se que o mercado cresça de 32,28 bilhões de dólares em 2022 para 64,69 bilhões de dólares até 2032. Neste contexto, é de grande valia estudos de falhas em motores sobrealimentados com turbocompressores para assegurar a segurança, eficiência, desempenho e conformidade com as regulamentações, contribuindo assim para o aprimoramento contínuo da indústria automotiva. Este trabalho concentra-se em compreender os aspectos metalúrgicos associados a falhas de pistões em motores de combustão interna, usando como estudo de caso uma falha em um pistão de motor a álcool quatro tempos com sobrealimentação, utilizado em competição estudantil Fórmula SAE. O objetivo foi compreender como se dão algumas das falhas em motores à combustão interna sobrealimentados para posteriores estudos e desenvolvimentos no setor automotivo. Através de técnicas de metalografia, microscopia eletrônica de varredura, ensaio de microdureza Vickers e simulações termodinâmicas, foi possível obter informações de como se desenvolvem falhas conhecidas em motores como microsolda de anéis e fusão de pistão de uma perspectiva metalúrgica e com isso observar que, para uma liga hipereutética de Al-Si com teor aproximado de 24% em massa de Si, falhas críticas como microsolda de anéis de vedação e arrancamento de materiais em pistões, em determinados casos, acabam sendo consequência de falhas menos severas como fusão de cabeça de pistão após um processo de fusão dinâmica específica.

**Palavras-chave:** Análise de falha, Pistão, Motor, FSAE, Powertrain, Turbo, Ligas Alumínio Silício.

## RESUMO EM LÍNGUA ESTRANGEIRA

With the automotive turbocharger market experiencing a significant increase due to lower  $CO_2$  emission limits and growing demand for high-performance vehicles, the market is predicted to grow from 32.28 billion dollars in 2022 to 64.69 billion of dollars by 2032. In this context, studies of failures in supercharged engines with turbochargers are of great value to ensure safety, efficiency, performance and compliance with regulations, thus contributing to the continuous improvement of the automotive industry. This work focuses on understanding the metallurgical aspects associated with piston failures in internal combustion engines, using as a case study a piston failure in a supercharged four-stroke alcohol engine, used in the Formula SAE student competition. The objective was to understand how some of the failures occur in supercharged internal combustion engines for further studies and developments in the automotive sector. Through metallography techniques, scanning electron microscopy, Vickers microhardness and thermodynamic simulations, it was possible to obtain information on how known faults develop in engines such as ring microwelding and piston melting from a metallurgical perspective and thus observe that, for a hypereutectic Al alloy -Si with an approximate content of 24% by mass of Si, critical failures such as microwelding of sealing rings and pulling out of materials in pistons, in certain cases, end up being a consequence of less severe failures such as melting of the piston head after a melting process dynamic and specific.

Keyword: Failure analysis. piston. engine. XJ6. FSAE. Powertrain. Turbo. Aluminum. Thermocalc. MEV.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Ilustração dos quatro tempos do motor alternativo (BRUNETTI, 2013). .....	3
Figura 2: Representação esquemática de estrutura comum de pistão e anéis. Fonte: própria (2024). .....	4
Figura 3: Representação dos anéis típicos de um pistão de motor à combustão interna. Fonte: própria (2024). .....	5
Figura 4: Falha por fusão na cabeça do pistão (TOMASZ; PIOTR, 2015b). .....	6
Figura 5: Falha por danos mecânicos em cabeça do pistão (TOMASZ; PIOTR, 2015b). .....	6
Figura 6: Falha por fusão da cabeça do pistão e da área do anel (TOMASZ; PIOTR, 2015b). .....	7
Figura 7: falha por desgaste da saia do pistão (TOMASZ; PIOTR, 2015b). .....	8
Figura 8: Falha por perfuração em cabeça do pistão (TOMASZ; PIOTR, 2015b). .....	9
Figura 9: Microsolda em anel de pistão de motor a combustão interna (TOMASZ; PIOTR, 2015b). .....	9
Figura 10: Posição de retirada das amostras de pistões falhados Fonte: própria (2024). ....	12
Figura 11: Pistões obtidos da primeira falha. Fonte: própria (2024). .....	12
Figura 12: Pistão obtido da segunda falha. Fonte: própria (2024). .....	13
Figura 13: Fusão da cabeça de pistão Fonte: própria (2024). .....	15
Figura 14: Fusão da cabeça do pistão e da área do anel identificados nas amostras. Indicada na figura por seta e/ou região tracejada. Fonte: própria (2024). .....	16
Figura 15: Danos mecânicos identificados nas amostras. Fonte: própria (2024). .....	17
Figura 16: Desgaste da saia do pistão identificados nas amostras. Fonte: própria (2024). ..	18
Figura 17: Microsolda identificados nas amostras. Fonte: própria (2024). .....	19
Figura 18: Arrancamento de material na lateral da cabeça do pistão na região. Fonte: própria (2024). .....	20
Figura 19: Imagens das camisas das câmaras de combustão após falha. Fonte: própria (2024). .....	21
Figura 20: Regiões analisadas por metalografia dos pistões falhados. Fonte: própria (2024). .....	22
Figura 21: Metalografia da região central da cabeça do pistão (a), região lateral da cabeça do pistão (b), região dos anéis do pistão (c), saia do pistão (d) e região interna do pistão (e). Fonte: própria (2024). .....	23
Figura 22: Análise metalográfica da seção transversal de F2-1, região periférica da cabeça do pistão. Fonte: própria (2024). .....	24

Figura 23: Análise metalográfica da seção transversal de F1-3, região periférica da cabeça do pistão. Fonte: própria (2024).....	25
Figura 24: Imagem de MEV de região superior da cabeça do pistão F2-2. Fonte: própria (2024).....	26
Figura 25: Imagem de MEV de região lateral da cabeça do pistão F2-2. Fonte: própria (2024). .....	27
Figura 26: Diagrama de solidificação da liga do pistão, em equilíbrio termodinâmico, obtido por ThermoCalc (Banco de dados TCAL7: Al-Alloys v7.1) . Fonte: própria (2024). ....	28
Figura 27: Diagrama Scheil de solidificação da liga do pistão, obtido por ThermoCalc (Banco de dados TCAL7: Al-Alloys v7.1) . Fonte: própria (2024).....	29
Figura 28: Liga Al-Si com Si primário refinado através de alta taxa de resfriamento. Fonte: modificado de ZHANG et al., (2020). ....	32
Figura 29: Estrutura de Al-Si (20% em massa), como fundida à taxa de resfriamento de 3,3 K/min. Fonte: modificado de L zang (2020).....	32
Figura 30: Distribuição de temperaturas em um pistão em funcionamento modificado de SHARMA; SAINI; SAMRIA (2015).....	33
Figura 31: Trinca a quente em uma peça de alumínio alta resistência, fundida. (POLYTECHNIQUE; DE LAUSANNE, 2007). ....	34
Figura 32: Imagem de microscópio óptico de trinca a quente em liga de AA-7075 (ABOULKHAIR et al., 2019).....	35
Figura 33: Imagem obtida por MEV de amostra de liga Al-Si hipereutética após deep etching. Fonte:(ABBOUD; MAZUMDER, 2020).....	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Falhas identificadas nas amostras.....	20
Tabela 2: Composições químicas obtidas por microanálise de EDS (% massa). ....	27
Tabela 3: Medidas de microdureza Vickers obtidas a partir da amostra F1-3, (unidades em HV). ....	30

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA/PRESSUPOSTOS TEÓRICOS/REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	2
2.1 Funcionamento dos motores a combustão interna 4T .....	2
2.2 Turbocompressores em motores de combustão interna .....	3
2.3 Pistões e anéis em motores a combustão interna 4T .....	3
2.4 Falhas em pistões de motores a combustão interna.....	5
2.4.1 Fusão em cabeça de pistão.....	5
2.4.2 Danos mecânicos no pistão.....	6
2.4.3 Fusão da cabeça do pistão e da área do anel .....	6
2.4.4 Desgaste da saia do pistão.....	7
2.4.5 Perfuração em cabeça de pistão .....	8
2.5 Falhas em anéis de pistões de motores a combustão interna.....	9
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	10
3.1 Da descrição da falha e amostras .....	10
3.2 Metodologia.....	13
<b>4 RESULTADOS</b> .....	14
4.1 Análise visual de pistões e anéis .....	14
4.2 Análise visual cilindros.....	21
4.3 Análise metalográfica .....	21
4.4 Microscopia eletrônica de varredura.....	25
4.5 Espectroscopia por energia dispersiva (EDS).....	27
4.6 Simulações em TermoCalc .....	27
4.7 Microdureza Vickers. ....	29
<b>5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	30
<b>6 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	38
REFERÊNCIAS.....	40

## 1 INTRODUÇÃO

A redução dos limites de emissão e crescente demanda por veículos de alto desempenho tem impulsionado o mercado de turbocompressores automotivos, projetando um crescimento de 32,28 bilhões de dólares em 2022 para 64,69 bilhões de dólares até 2032, há uma taxa composta de crescimento anual de aproximadamente 7,2% ao ano (Precedenceresearch, 2022). Neste cenário o estudo de falhas em motores sobrealimentados com turbocompressores é fundamental para garantir a segurança, o desempenho eficiente e a conformidade com as regulamentações, contribuindo para a evolução e aprimoramento contínuo da indústria automotiva.

Este trabalho tem por objetivo compreender os aspectos metalúrgicos envolvidos em falhas de pistões de motor de combustão interna através do estudo de caso de uma falha de pistão de motor 4T (quatro tempos) a álcool sobrealimento promovendo embasamento para futuros estudos e desenvolvimentos do setor automotivo.

O material de estudo deste trabalho foi retirado de um motor de moto urbana Yamaha modelo XJ6 ano 2009, 600cc preparado e adaptado para um veículo de competição estudantil SAE (*Society of Automotive Engineers*), com inserção de sistema de sobrealimentação através de turbocompressão.

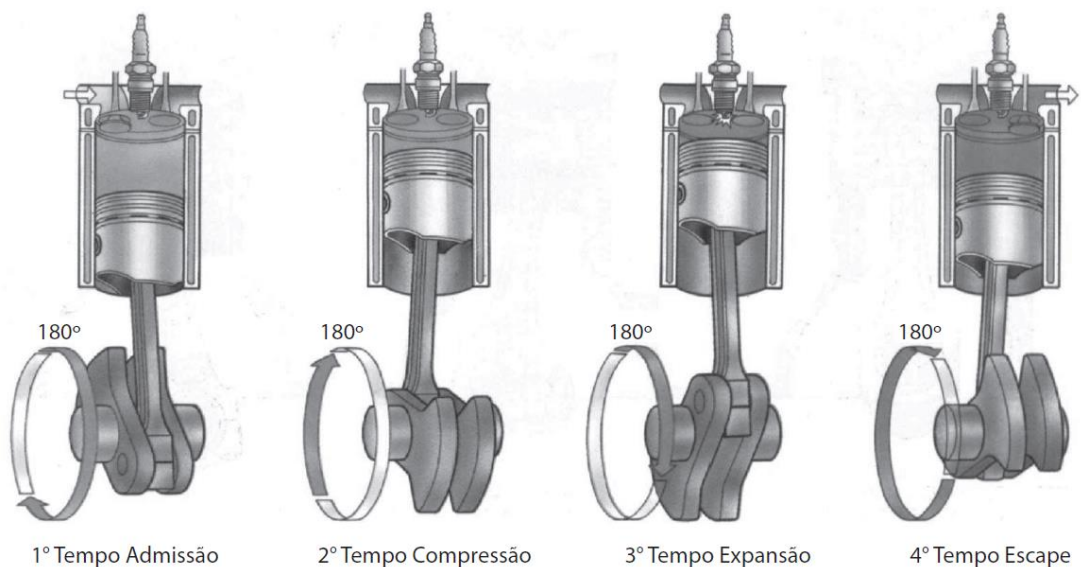
Na sequência será feita uma revisão dos fundamentos teóricos relacionados necessários à compreensão do funcionamento do sistema de motores 4T turboalimentados, seus componentes e tipos de falhas mais comuns e conhecidas que se dão neste tipo de motores, serão apresentados os resultados e discussão da análise de falha e conclusão.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA/PRESSUPOSTOS TEÓRICOS/REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Funcionamento dos motores a combustão interna 4T**

Como descrito por F. Brunetti, o motor a combustão interna de quatro tempos é composto simplificada por uma câmara de combustão, constituída pela camisa do cilindro, pistão e anéis. O pistão é uma peça móvel que se move dentro da camisa do cilindro, criando um espaço de combustão. O objetivo do movimento do pistão é transformar a energia térmica gerada por sucessivas combustões em energia mecânica, que é utilizada para movimentar o veículo. Os anéis de vedação ajudam a manter a pressão e a lubrificação adequadas dentro do cilindro, garantindo o bom funcionamento do motor (BRUNETTI, 2013).

Os motores quatro tempos são classificados assim devido à existência de 4 momentos bem definidos de funcionamento no que diz respeito à câmara de combustão, Figura 1. Durante o primeiro tempo, a mistura ar-combustível é admitida na câmara de combustão. No segundo tempo, o pistão sobe, comprimindo a mistura, aumentando a pressão e a temperatura da mistura, preparando-a para a combustão. No terceiro tempo, a mistura é inflamada pela vela de ignição, gerando uma explosão que empurra o pistão para baixo. Esse movimento de expansão é o que gera a energia mecânica que é utilizada para movimentar o veículo. No quarto tempo, o pistão sobe novamente, expulsando os gases de escape (BRUNETTI, 2013).



*Figura 1: Ilustração dos quatro tempos do motor alternativo (BRUNETTI, 2013).*

## 2.2 Turbocompressores em motores de combustão interna

O objetivo da utilização de turbocompressores em motores de combustão interna de quatro tempos é aumentar a quantidade de ar admitida pelo motor, o que permite uma maior quantidade de combustível a ser queimada e, conseqüentemente, um aumento na potência do motor. O turbocompressor é composto por uma turbina e um compressor, que são acionados pelos gases de escape do motor. A turbina utiliza a energia dos gases de escape para acionar o compressor, que comprime o ar admitido pelo motor. Com a compressão do ar, a densidade do ar aumenta, permitindo que mais combustível seja queimado e, portanto, gerando mais potência (BRUNETTI, 2013).

## 2.3 Pistões e anéis em motores a combustão interna 4T

O pistão é uma das principais peças dos motores de combustão interna e seu movimento é responsável por converter a energia gerada pela combustão em movimento linear. O pistão é composto por várias partes, ilustradas na Figura 2, incluindo a cabeça, topo, fundo, anéis (superior, secundário e de lubrificação), o pino do pistão e as saias. A cabeça do pistão é a parte superior que entra em contato com a mistura ar-combustível e é responsável por transmitir a energia gerada pela combustão para o virabrequim. O topo do pistão é a parte superior da cabeça do pistão e é responsável por ajudar a direcionar a mistura ar-combustível para a câmara de

combustão. O fundo do pistão é a parte inferior que entra em contato com o virabrequim e é responsável por transmitir a energia gerada pela combustão para o virabrequim. O pino do pistão é uma peça cilíndrica que conecta o pistão à biela. As saias do pistão são as partes laterais do pistão que ajudam a guiar o pistão dentro do cilindro (BRUNETTI, 2013).

Os pistões dessa classe de motores comumente são equipados com anéis de vedação, mostrados na Figura 3, que são responsáveis por garantir a vedação entre o pistão e o cilindro. Os anéis de vedação são geralmente feitos de aço e são instalados em ranhuras no pistão. Os anéis de vedação são classificados em três tipos: anel de compressão superior, anel de compressão inferior e anel raspador de óleo. O anel de compressão superior é responsável por vedar a câmara de combustão, enquanto o anel de compressão inferior ajuda a vedar a parte inferior do pistão. O anel de lubrificação é responsável por raspar o excesso de óleo do cilindro e evitar que ele entre na câmara de combustão superior, além de garantir lubrificação para movimentação do pistão, reduzindo atrito entre a saia do pistão e a camisa do cilindro.

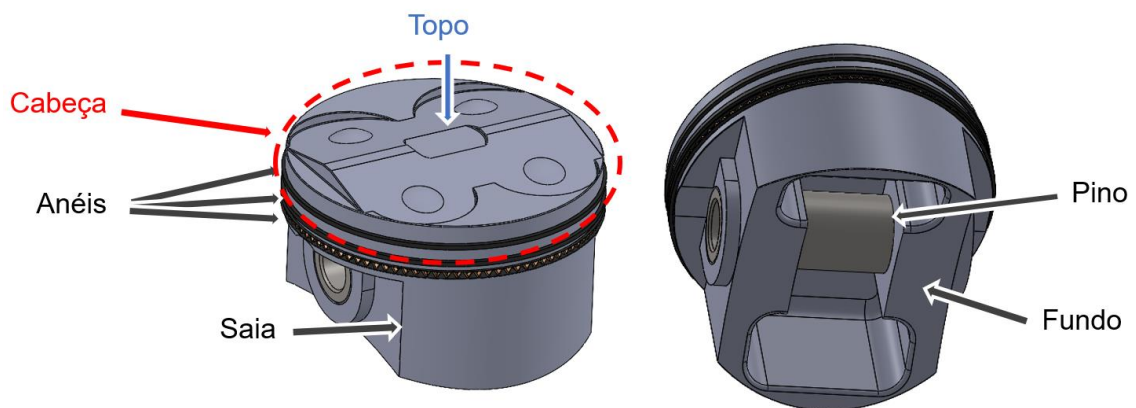
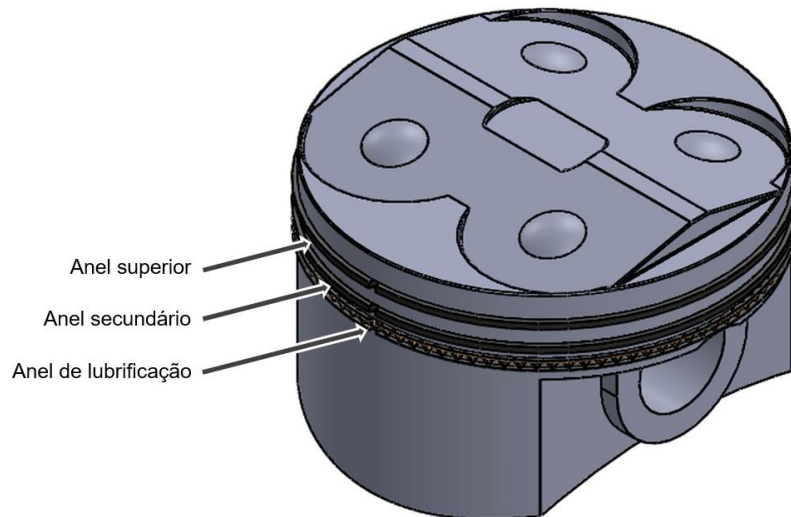


Figura 2: Representação esquemática de estrutura comum de pistão e anéis. Fonte: própria (2024).



*Figura 3: Representação dos anéis típicos de um pistão de motor à combustão interna.  
Fonte: própria (2024).*

## 2.4 Falhas em pistões de motores a combustão interna

(TOMASZ; PIOTR, 2015a) As falhas em pistões de motores à combustão interna mais comuns, como descrito por Ambrozik (TOMASZ; PIOTR, 2015a), serão detalhadas na sequência.

### **2.4.1 Fusão em cabeça de pistão**

A fusão na cabeça do pistão ocorre quando a temperatura na câmara de combustão é muito alta, o que pode levar à fusão do material do pistão, como exemplificado na Figura 4. Esse tipo de falha pode ser causado por uma variedade de fatores, incluindo a qualidade do combustível, a malha do sistema de alimentação do motor, a operação incorreta do motor ou a manutenção inadequada do motor. A fusão na cabeça do pistão pode levar a uma perda significativa de potência do motor.(TOMASZ; PIOTR, 2015a).



*Figura 4: Falha por fusão na cabeça do pistão (TOMASZ; PIOTR, 2015b).*

#### **2.4.2 Danos mecânicos no pistão**

Os danos mecânicos no pistão ocorrem quando um objeto estranho entra na câmara de combustão e colide com o pistão, causando danos mecânicos, como ilustrado na Figura 5. Esse tipo de falha pode ser causado por uma variedade de fatores, incluindo a entrada de detritos na câmara de combustão através do filtro de ar ou durante o trabalho de reparo ou manutenção. Os danos mecânicos no pistão têm o potencial de resultar em uma redução expressiva da potência do motor, podendo até mesmo inviabilizar o funcionamento do motor (TOMASZ; PIOTR, 2015a).



*Figura 5: Falha por danos mecânicos em cabeça do pistão (TOMASZ; PIOTR, 2015b).*

#### **2.4.3 Fusão da cabeça do pistão e da área do anel**

A fusão da cabeça do pistão e da área do anel ocorre quando a temperatura na câmara de combustão é muito alta, o que pode levar à fusão do material do pistão,

como é o caso mostrado na Figura 6. Esse tipo de falha pode ser causado por uma variedade de fatores, incluindo a qualidade do combustível, mapeamento do sistema de alimentação do motor, operação incorreta do motor ou manutenção inadequada do motor. A fusão da cabeça do pistão e da área do anel pode resultar em uma notável diminuição na potência do motor, podendo inclusive ocasionar bloquear o funcionamento do mesmo (TOMASZ; PIOTR, 2015a). Esta falha se difere da falha por fusão em cabeça do pistão, por não se limitar à região central da cabeça do pistão, mas se propagar para a região dos anéis de vedação, mostrando uma distribuição diferente de calor na câmara de combustão.



*Figura 6: Falha por fusão da cabeça do pistão e da área do anel (TOMASZ; PIOTR, 2015b).*

#### **2.4.4 Desgaste da saia do pistão**

O desgaste da saia do pistão ocorre quando a saia do pistão é desgastada devido ao contato com o cilindro, resultando em falhas semelhantes à apontada na Figura 7. Embora este desgaste seja previsto durante a vida útil do motor, esse tipo de falha se caracteriza por um desgaste prematuro, podendo ser causado por uma variedade de fatores, incluindo a qualidade do combustível, a malha do sistema de alimentação do motor, a operação incorreta do motor ou a manutenção inadequada do motor. O desgaste da saia do pistão pode provocar uma considerável diminuição na potência do motor (TOMASZ; PIOTR, 2015a).



*Figura 7: falha por desgaste da saia do pistão (TOMASZ; PIOTR, 2015b).*

#### **2.4.5 Perfuração em cabeça de pistão**

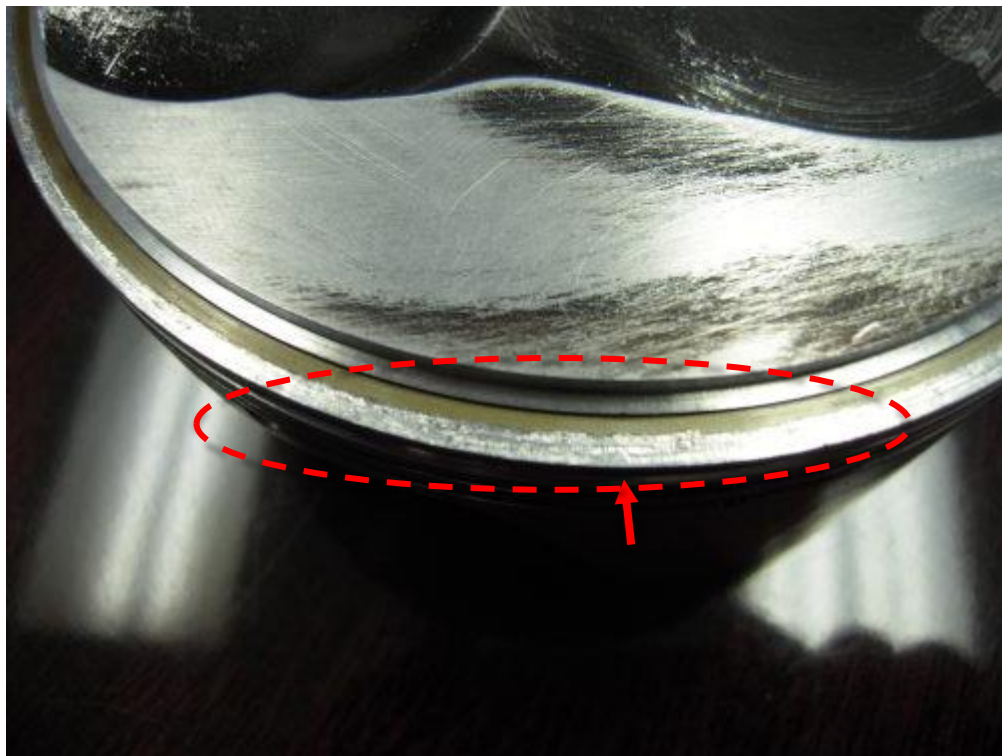
A perfuração da cabeça do pistão ocorre quando um objeto estranho entra na câmara de combustão e perfura a cabeça do pistão, defeito mostrado na Figura 8. Esse tipo de falha pode ser causado por uma variedade de fatores, incluindo a entrada de detritos na câmara de combustão através do filtro de ar ou durante o trabalho de reparo ou manutenção. A perfuração da cabeça do pistão em geral leva a perda significativa de potência do motor instantânea (TOMASZ; PIOTR, 2015a), podendo ser consequência de um dano mecânico ou, na maioria dos casos, de uma fusão localizada no centro da cabeça do pistão, divergindo da fusão em cabeça do pistão por gerar um ponto de comunicação entre a câmara de combustão e a parte inferior do motor, localizada abaixo do pistão, inviabilizando a compressão de gases dentro da câmara.



*Figura 8: Falha por perfuração em cabeça do pistão (TOMASZ; PIOTR, 2015b).*

### 2.5 Falhas em anéis de pistões de motores a combustão interna

De acordo com Mark Shuster et all (1996<sup>a</sup>), o fenômeno de microsoldagem em anéis de pistão ocorre devido à aderência de partículas de alumínio do pistão ao anel, como mostrado na Figura 9. Essas partículas de alumínio se separam do pistão e ficam presas no espaço entre o pistão e o anel. Durante o funcionamento do motor, essas partículas sofrem deformação plástica e aquecimento repetidos, o que leva à microsoldagem. A microsoldagem é definida como uma "coesão localizada de metais ou não-metais produzida pelo aquecimento dos materiais a temperaturas elevadas, com ou sem a aplicação de pressão, ou pela aplicação de pressão sozinha e com ou sem o uso de material de enchimento". O mecanismo desse dano superficial pode ser causado por desgaste por aderência (escorregamento a frio ou a quente) ou corrosão por *fretting*, dependendo das circunstâncias (SHUSTER et al., 1996a).



*Figura 9: Microsolda em anel de pistão de motor a combustão interna (TOMASZ; PIOTR, 2015b).*

Segundo Shuster et al. (1996b), a microsoldagem em anéis de pistão pode ter várias implicações negativas. Primeiro, pode levar a uma perda de vedação do anel do pistão, o que pode resultar em uma diminuição da eficiência do motor e aumento

do consumo de combustível. Além disso, a microsoldagem pode causar danos ao pistão e ao cilindro, o que pode levar a uma falha catastrófica do motor, através do travamento do movimento do pistão, ocasionando travamento de virabrequim e possível quebra de componentes estruturais como bloco ou camisa do cilindro. A microsoldagem também pode causar um aumento na temperatura do pistão e do cilindro, o que pode levar a uma redução na vida útil do motor.

Por fim, a microsoldagem, embora seja uma falha conhecida, pode ser um problema difícil de detectar, pois pode ocorrer de forma esporádica e imprevisível, tornando difícil a identificação da causa raiz do problema (SHUSTER et al., 1996b).

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Da descrição da falha e amostras**

Os materiais de estudo foram obtidos de pistões que sofreram falhas do motor utilizado pela equipe de Fórmula SAE (combustão) da Universidade Federal de São Carlos no ano de 2019. Motor este a combustão interna 600cc 4T retirado de uma motocicleta de uso urbano e modificado para uso em competição. Dentre as modificações destacam-se a substituição completa do sistema de arrefecimento, admissão, exaustão e do sistema de controle e injeção.

O sistema de gerenciamento foi substituído por um contendo unidade de controle eletrônico (ECU) programável, enquanto o sistema de arrefecimento foi redimensionando, sendo desenvolvido um radiador próprio, com base na cilindrada e ciclos de combustão esperados. Por fim, o sistema de admissão e exaustão foi desenvolvido para sobrealimentação do motor, através do uso de turbocompressor, Garret modelo GT0632SZ, operando a pressão de 1 kgf/cm<sup>2</sup>, no entanto, sem uso de equipamento “*intercooler*” (dedicado ao resfriamento do ar admitido após passagem por turbocompressão (processo que aquece significativamente o ar).

A falha analisada em questão é caracterizada pela fusão parcial da cabeça de um ou mais pistões do motor e, para ambos os casos, levou a perda perceptível e brusca de potência.

No que diz respeito à ocorrência da falha, dois episódios chamam a atenção, sendo elas descritas como Falha 1 e Falha 2.

A Falha 1 se deu 5 semanas antes da 17ª competição Fórmula SAE Brasil, durante a calibração e testes do veículo em dinamômetro de rolo, equipamento utilizado para medir o trabalho executado pelo veículo de acordo com a faixa de rotação. Neste momento o motor é levado a esforços contínuos, a fim de se obter relações de torque e potência em função de rotações por minuto do motor, enquanto ajustes são realizados no mapa de injeção para maximizar os resultados obtidos.

Após algumas horas de calibração, em meio a acelerações consecutivas, a potência medida pelo dinamômetro caiu bruscamente, seguida de escape de fumaça conhecido como "*blowby*" através da mangueira de retorno de óleo do motor.

O termo "*blowby*" refere-se a uma condição em motores de combustão interna onde uma pequena quantidade de gases de combustão vaza além dos anéis dos pistões para a câmara de cárter do motor. Durante o ciclo de combustão, os gases gerados pela queima do combustível e do ar na câmara de combustão pressionam os pistões para baixo, impulsionando o movimento do motor. No entanto, nem todos esses gases são completamente contidos pela vedação entre os pistões e os cilindros.

O "*blowby*" ocorre quando parte desses gases de combustão escapa pelos anéis dos pistões e entra na área do cárter, que é a parte inferior do motor onde o óleo do motor é armazenado. Isso pode ocorrer devido ao desgaste dos anéis dos pistões, folgas excessivas nos cilindros ou outros problemas relacionados aos componentes do motor como falha dos pistões ou anéis de vedação.

Este fenômeno (*Blowby*) não é desejável, pois pode resultar em vários problemas como contaminação do óleo do motor com produtos de combustão, diminuição da eficiência do motor e aumento da emissão de poluentes. Os fabricantes de motores geralmente projetam sistemas de ventilação do cárter para lidar com o *blowby*, permitindo que os gases escapados sejam direcionados para fora do motor e reciclados adequadamente.

Nesta primeira falha todos os 4 pistões presentes apresentaram falha.

A Falha 2 se deu ao final dos primeiros 11km da prova de enduro da 17ª competição Fórmula SAE Brasil, onde não houve indícios externos ao motor de que houve falha. Neste segundo caso, ressalta-se que o enduro é uma prova cuja maior pontuação é obtida pela redução do tempo de percurso, por isso, devido à extensão,

o motor é levado ao seu máximo esforço. Nesta segunda falha, 2 pistões falharam, dentre os quais só foi possível acesso a um deles para análise.

Para efeito de identificação dos pistões, estes foram identificados como F1-1, F1-2, F1-3 e F1-4, amostras da primeira falha (Figura 11) e F2-1, amostra obtida da segunda falha (Figura 12), sendo suas posições de retirada ilustradas na Figura 10.

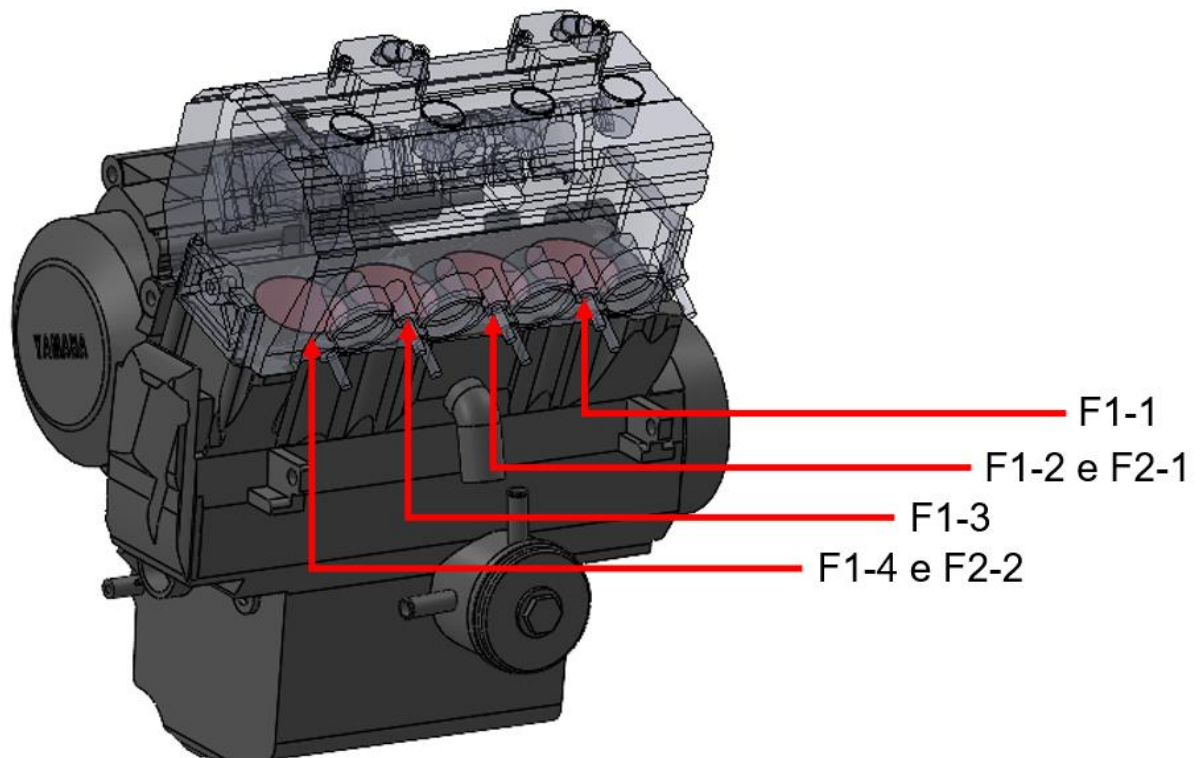


Figura 10: Posição de retirada das amostras de pistões falhados Fonte: própria (2024).



Figura 11: Pistões obtidos da primeira falha. Fonte: própria (2024).



*Figura 12: Pistão obtido da segunda falha. Fonte: própria (2024).*

### 3.2 Metodologia

Como todas as falhas de pistões de motores a combustão interna descritas em literatura podem ser identificadas visualmente no pistão, anéis ou cilindro de combustão, o primeiro procedimento realizado foi a análise visual dos pistões, seguida da análise das câmaras de combustão, a fim de identificar todas as falhas presentes em cada caso. Para análise visual foram realizadas sucessivas limpezas dos componentes utilizando-se água e sabão neutro, seguido de banho em ultrassom com acetona. A análise visual direta envolve a inspeção minuciosa da falha, destacando-se áreas críticas e sinais visíveis por meio de ferramentas analíticas como câmeras com lente macro e lentes para aumento, que permitem uma análise superficial das falhas presentes. A partir disto, imagens fotográficas foram obtidas para documentação, registrando detalhes visuais e preservando a condição original da falha.

A segunda etapa constituiu-se pela obtenção de seções de interesse dos corpos de prova para análise metalográfica em microscópio ótico. A análise metalográfica é uma técnica fundamental para investigar a microestrutura dos materiais metálicos. Inicialmente, a amostra cortada representativa é embutida em resina epóxi, seguida por lixamento em lixas de granulometria 120, 240, 450, 600, 1200, 2400 e polimento com pasta de diamante 1  $\mu\text{m}$  e solução de sílica coloidal, visando revelar detalhes da microestrutura. Em seguida, a amostra foi avaliada com diferentes ampliações, permitindo a observação de partículas anômalas, fases distintas e defeitos estruturais.

Em um terceiro momento, as seções embutidas e seções retiradas da superfície do pistão e, também, os anéis dos pistões foram levados ao microscópio eletrônico de varredura (FEI Modelo Quanta 400) para caracterização morfológica da falha, onde foi possível se observar a morfologia da segunda fase da liga (Si- $\beta$ ) por imagens obtidas por MEV utilizando detectores BSD (elétrons retroespalhados) e SE (elétrons secundários) e microanálise química por EDS (Espectroscopia por energia dispersiva).

A partir das composições químicas obtidas por EDS e das análises no MEV, utilizou-se como técnica completar a simulação termodinâmica pelo método CALPHAD (CALculation PHase Diagrams). Este método computacional para cálculo de diagramas de fase faz uso de bases de dados específicas, neste caso base TCAL7: Al-Alloys v7.1, tornando possível, de maneira rápida, prever os microconstituintes formados, as propriedades, diagramas de equilíbrio e solidificação, dentre outras características de sistemas multicomponentes.

Por fim foi realizada análise de microdureza Vickers em cinco regiões distintas em microdurômetro (Modelo HMV) com carga de 200g por 15s e medições realizadas em objetiva de 40x. Esta técnica de ensaio mecânico é utilizada para avaliar a resistência de materiais à deformação plástica sob a aplicação controlada de uma carga específica. O teste envolve a penetração de um indentador de diamante em forma de pirâmide de base quadrada na superfície da amostra, mantendo uma carga predeterminada por um tempo específico. Após a aplicação da carga, a profundidade da impressão deixada pelo indentador é medida e utilizada para calcular a dureza Vickers, expressa em unidades HV. Este método oferece uma abordagem versátil, sendo aplicável a uma variedade de materiais, proporcionando resultados precisos que são valiosos para análises de controle de qualidade e estudos de propriedades mecânicas de materiais.

## **4 RESULTADOS**

### **4.1 Análise visual de pistões e anéis**

No que diz respeito à análise visual dos pistões, seis principais tipos de falhas foram observadas: fusão da cabeça do pistão, fusão da cabeça pistão e da área do

anel, danos mecânicos do pistão, desgaste da saia, microsolda, além de arrancamento de material da região lateral da cabeça do pistão.

Em relação às fusões observadas, chama atenção um aspecto poroso, tanto na parte superior da cabeça do pistão, quanto na lateral do mesmo (região dos anéis), mostrado nas Figura 13 e Figura 14. Já os danos mecânicos se caracterizaram por pequenas endentações com aproximadamente 1 mm de diâmetro (Figura 15). Por fim, o arrancamento de material foi observado pela presença visível de deformação plástica na região com ausência de material, indicando que em algum momento da falha dos pistões houve tensões de cisalhamento responsáveis pelo arrancamento de pequenas partes da cabeça do pistão, sempre acompanhadas de porosidade nas proximidades da região de arrancamento (Figura 17).

As figuras 13 a 17 ilustram as falhas identificadas, enquanto na tabela 1, são descritos quais defeitos foram observados em cada amostra.



*Figura 13: Fusão da cabeça de pistão Fonte: própria (2024).*

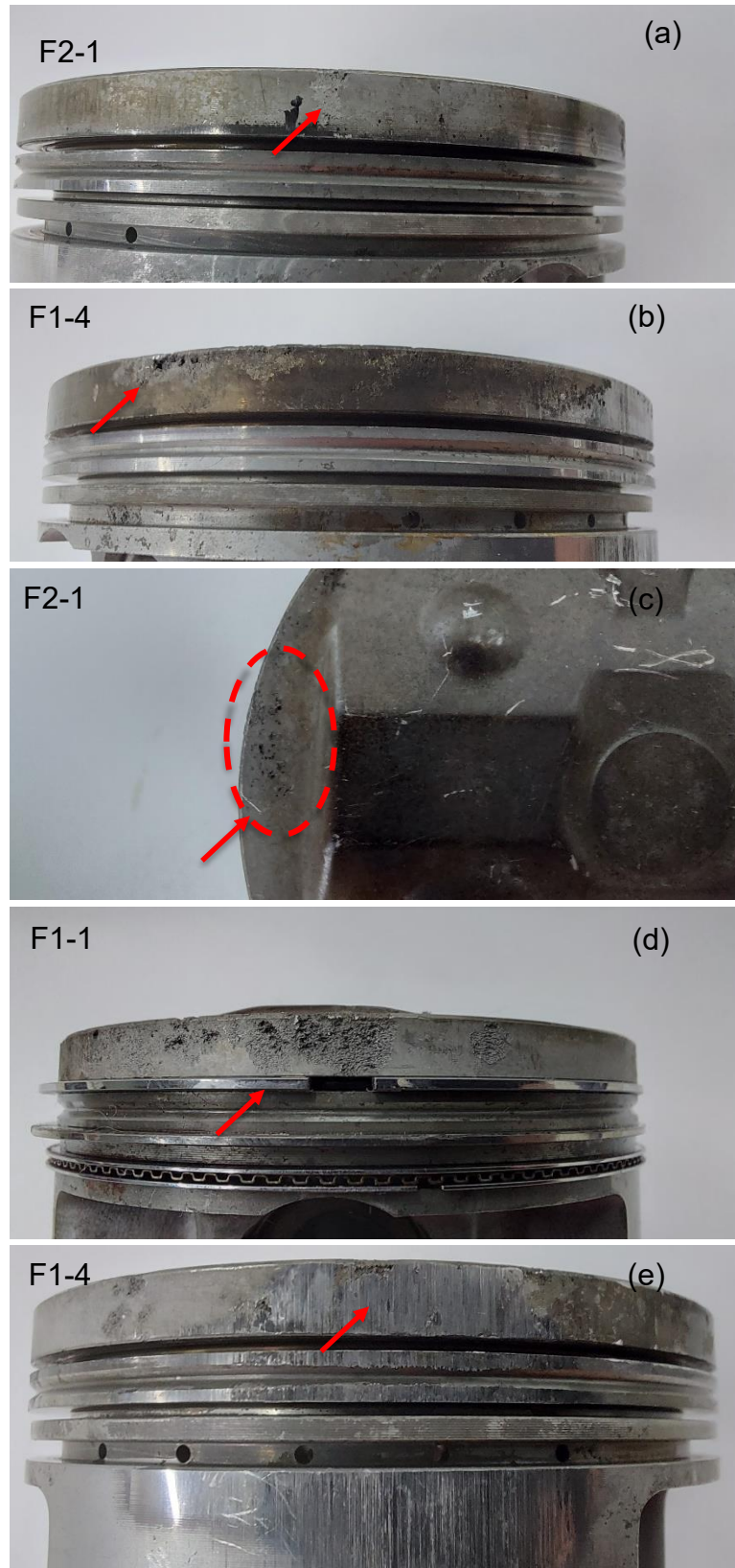


Figura 14: Fusão da cabeça do pistão e da área do anel identificados nas amostras. Indicada na figura por seta e/ou região tracejada. Fonte: própria (2024).

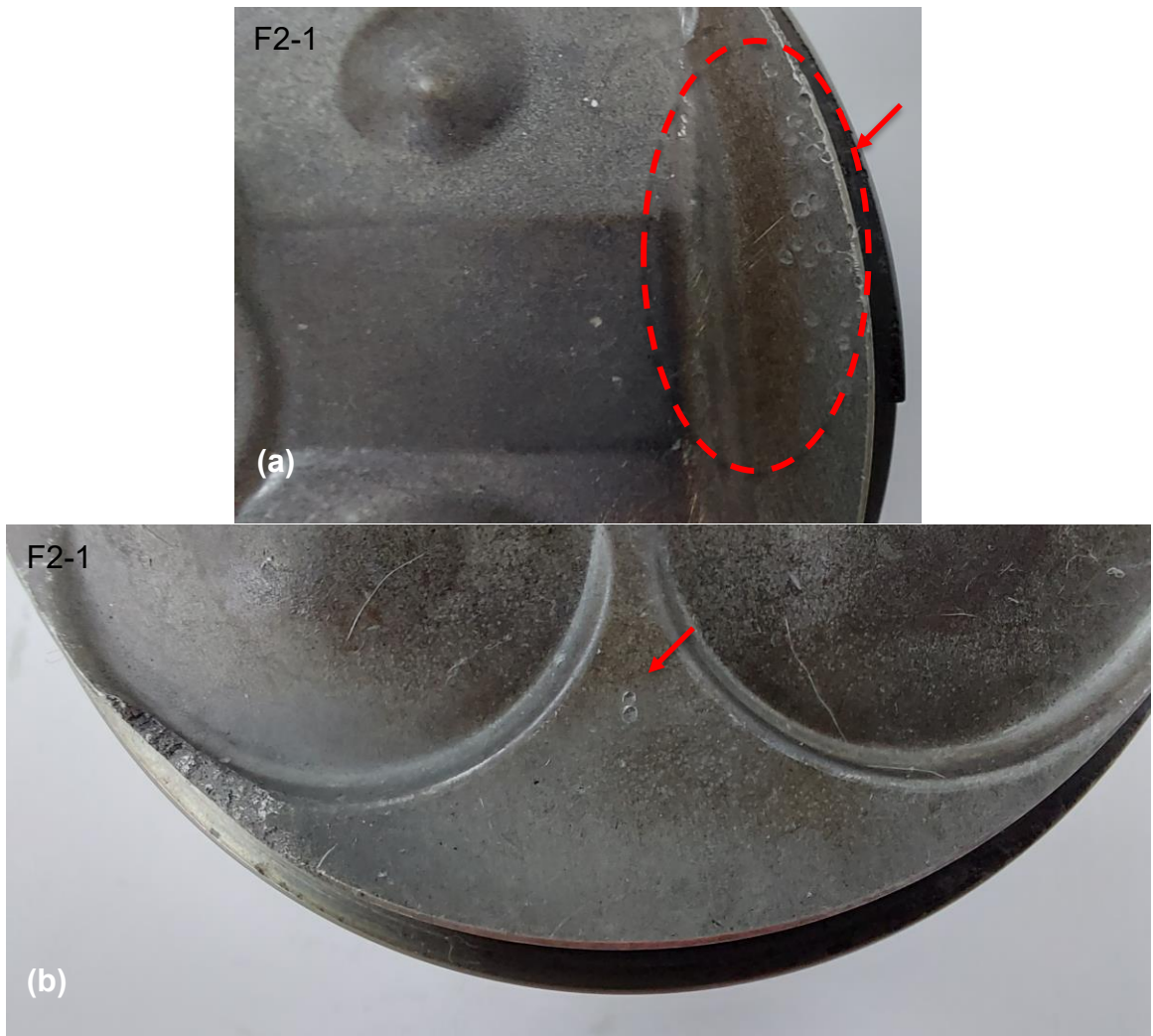


Figura 15: Danos mecânicos identificados nas amostras. Fonte: própria (2024).

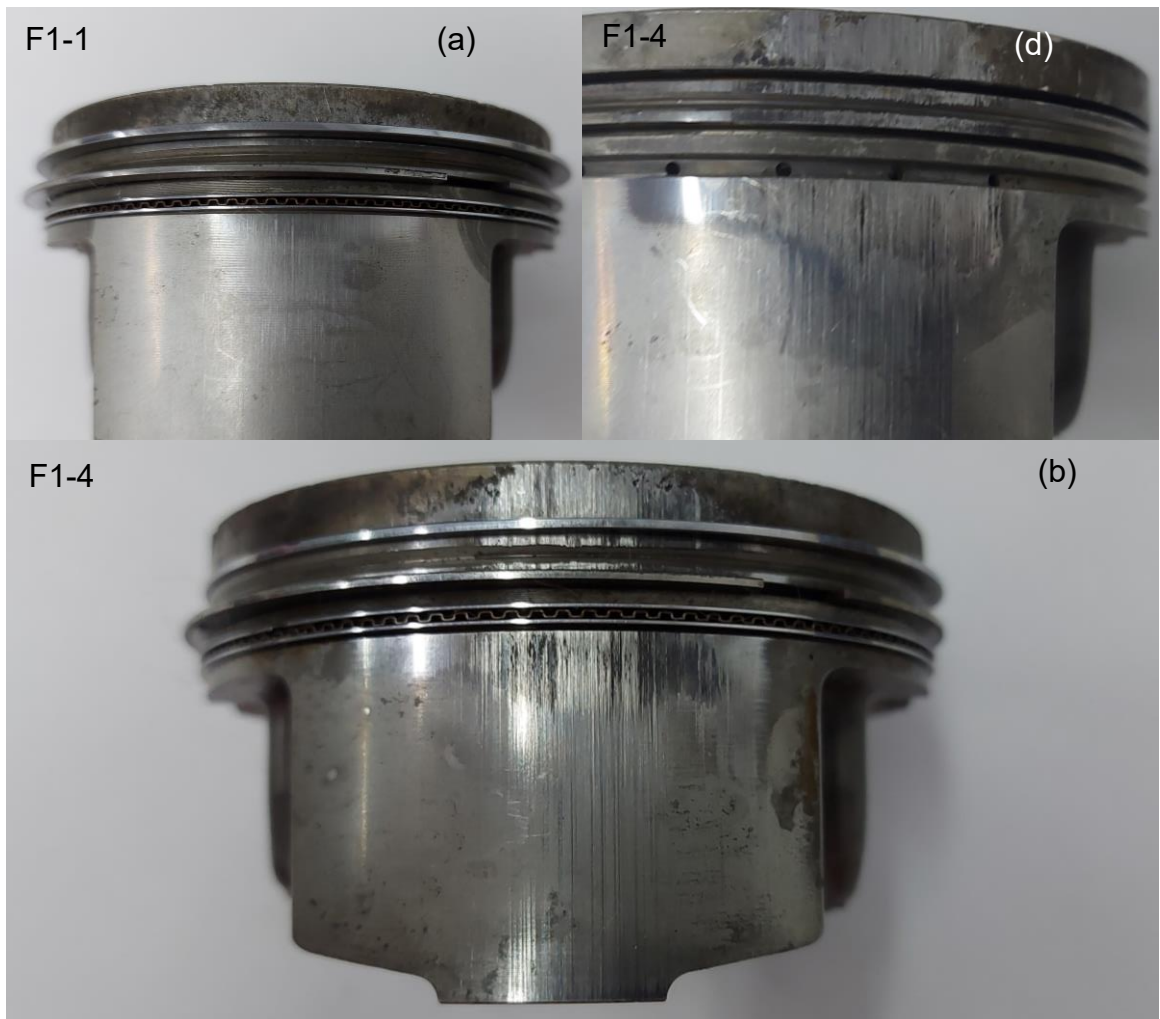


Figura 16: Desgaste da saia do pistão identificados nas amostras. Fonte: própria (2024).



*Figura 17: Microsolda identificados nas amostras. Fonte: própria (2024).*

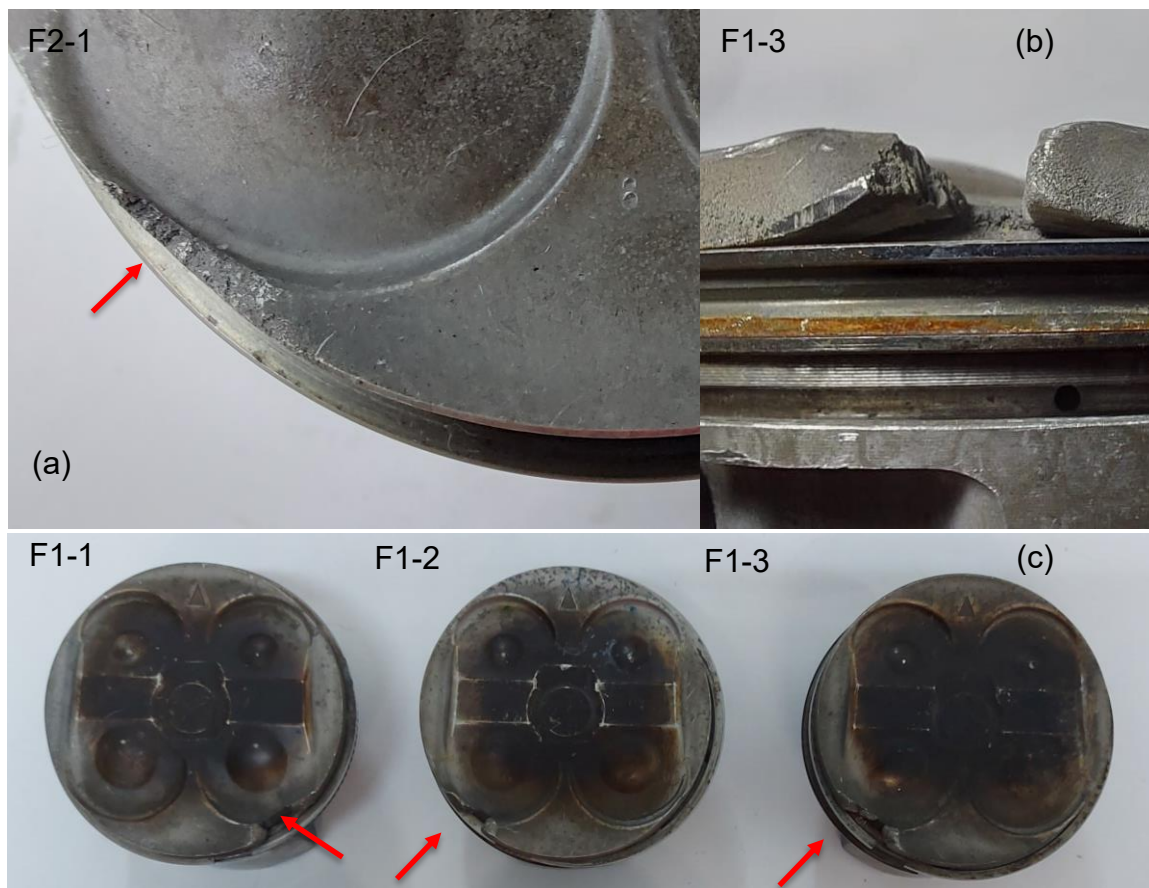


Figura 18: Arrancamento de material na lateral da cabeça do pistão na região. Fonte: própria (2024).

Tabela 1: Falhas identificadas nas amostras.

	F1-1	F1-2	F1-3	F1-4	F2-1
Fusão em cabeça de pistão	-	-	-	✓	-
Danos mecânicos no pistão	-	-	-	-	✓
Fusão da cabeça do pistão e área dos anéis	✓	✓	✓	✓	✓
Desgaste da saia do pistão	✓	✓	✓	✓	✓
Microsolda	✓	-	✓	✓	✓
Arrancamento de material	✓	✓	✓	✓	✓

## 4.2 Análise visual cilindros

Ao contrário dos pistões analisados, na análise visual dos cilindros de combustão do motor não foram observados quaisquer possíveis defeitos ocorridos durante a falha, como mostra a Figura 19. O que se observa são leves deposições de produtos de combustão e marcas verticais de desgastes, provenientes do contato da camisa com a saia do pistão e anéis. Contudo, não foram observadas evidências de desgaste excessivo ou além do esperado para o tempo em serviço do motor.



Figura 19: Imagens das camisas das câmaras de combustão após falha. Fonte: própria (2024).

## 4.3 Análise metalográfica

Dentre as seções analisadas por metalografia, cinco principais regiões apresentaram estruturas e falhas dissimilares, a saber: (a) a região central da cabeça do pistão, (b) região lateral da cabeça do pistão, (c) região dos anéis, (d) saia do pistão e (e) região interna do pistão, conforme ilustradas na Figura 20.

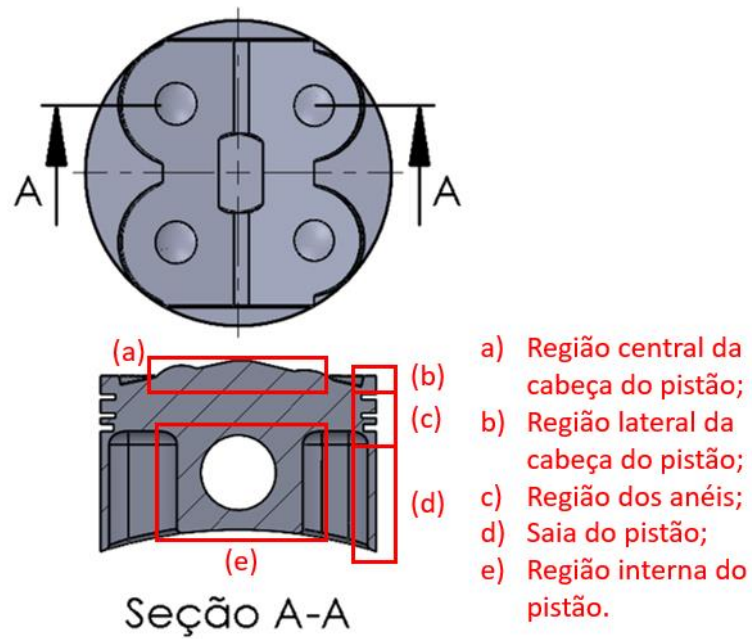


Figura 20: Regiões analisadas por metalografia dos pistões falhados. Fonte: própria (2024).

A Figura 21 apresenta imagens metalográficas da seção transversal das regiões (a), (b), (c), (d) e (e) da cabeça do pistão.

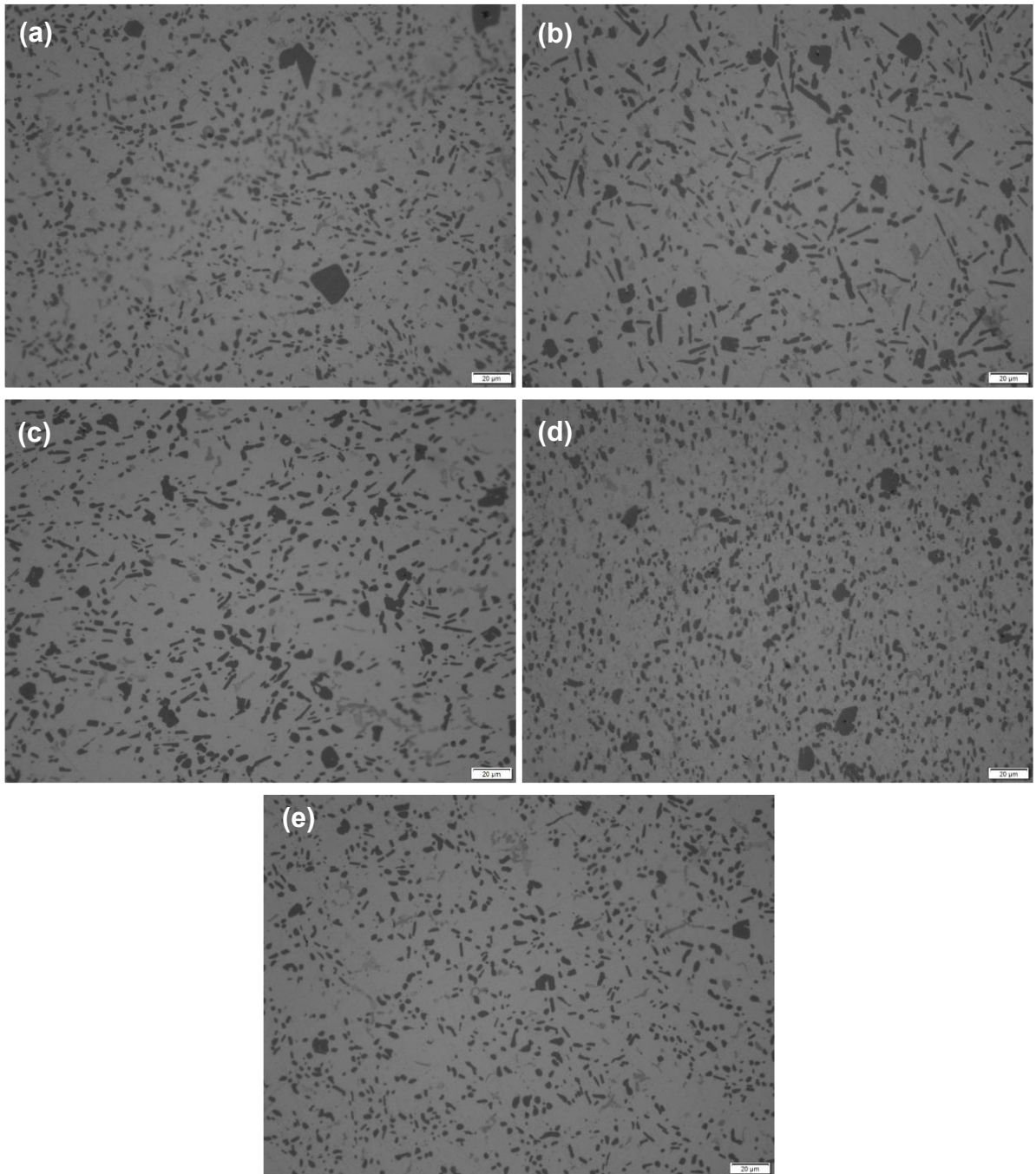
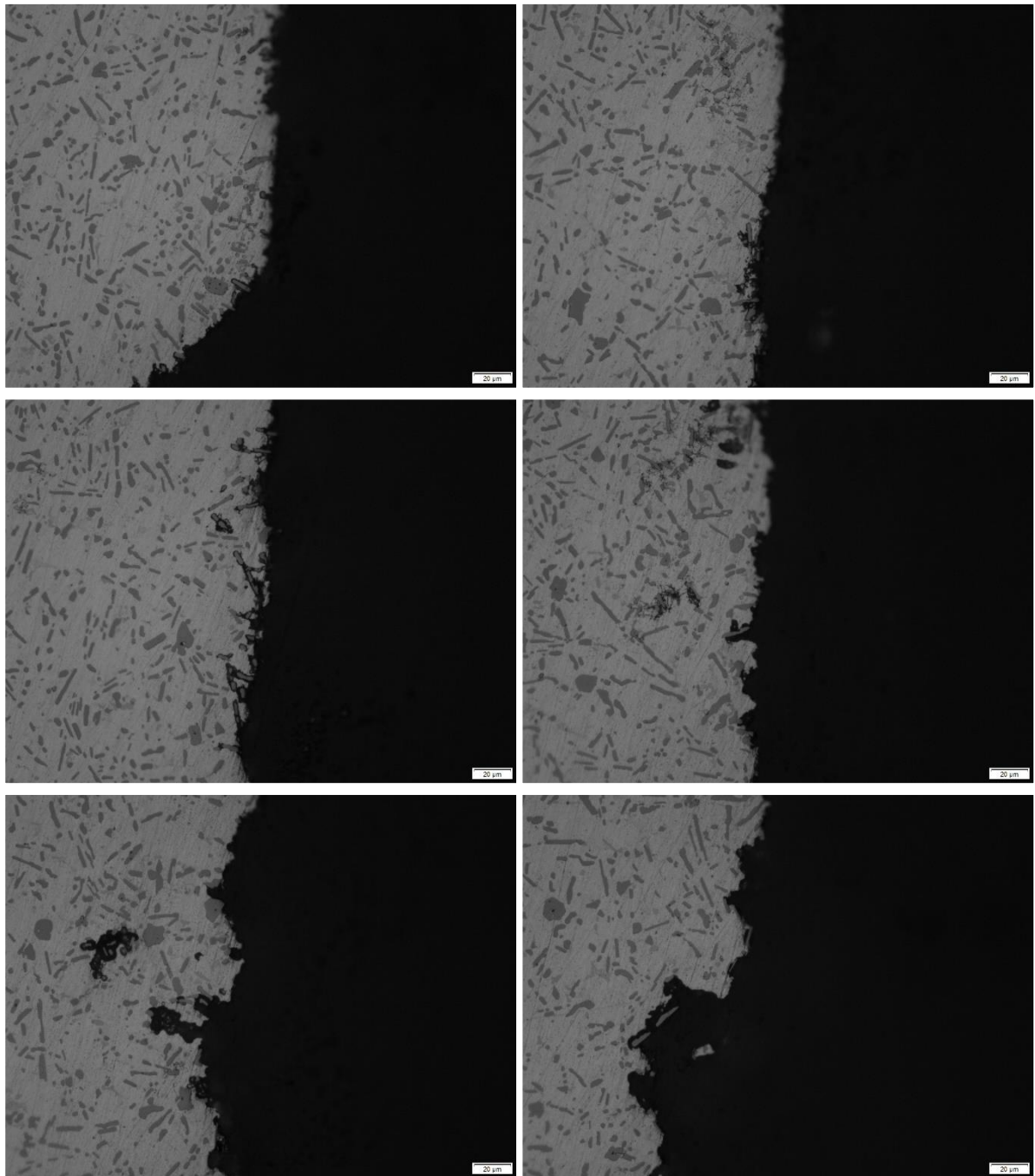
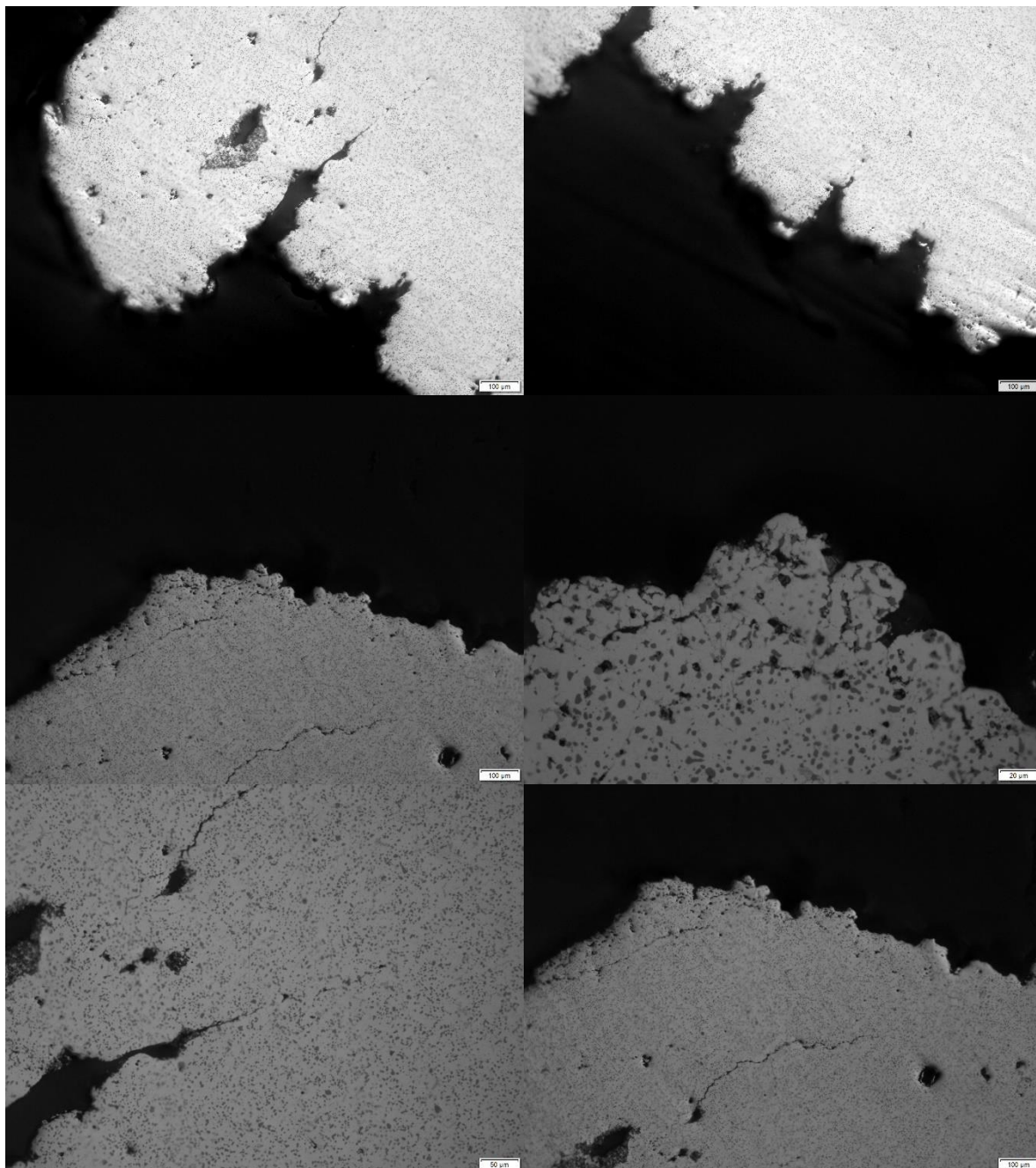


Figura 21: Metalografia da região central da cabeça do pistão (a), região lateral da cabeça do pistão (b), região dos anéis do pistão (c), saia do pistão (d) e região interna do pistão (e). Fonte: própria (2024).

Na Figura 22 são mostrados resultados da metalografia realizada a partir da amostra F2-1 em pontos de início de fusão na região lateral da cabeça do pistão . A Figura 23 mostra as micrografias da amostra F1-3, onde houve arrancamento de material.



*Figura 22: Análise metalográfica da seção transversal de F2-1, região periférica da cabeça do pistão. Fonte: própria (2024).*



*Figura 23: Análise metalográfica da seção transversal de F1-3, região periférica da cabeça do pistão. Fonte: própria (2024).*

#### 4.4 Microscopia eletrônica de varredura

A fim de se obter mais informações sobre a morfologia das fusões presentes nos pistões, a amostra F2-1 foi observada lateralmente e de topo. Esta análise teve como principal objetivo tentar identificar indícios de como se desenvolveu estas fusões, se foram fusões homogêneas e se houve fusão de alguma fase em particular.

A Figura 24 e Figura 25 nos trazem a estrutura encontrada, para magnificações de até 800x.

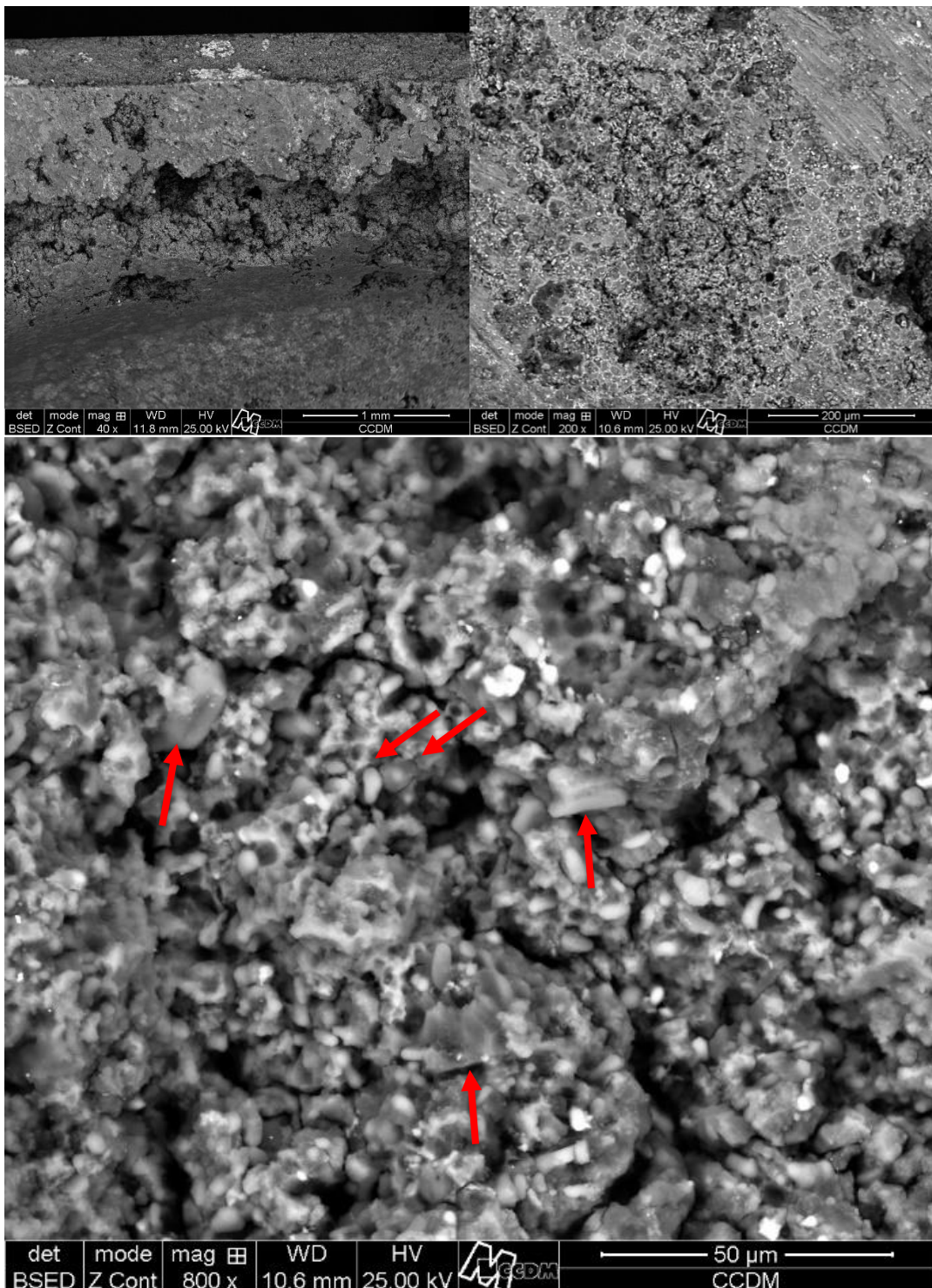


Figura 24: Imagem de MEV de região superior da cabeça do pistão F2-2. Fonte: própria (2024).

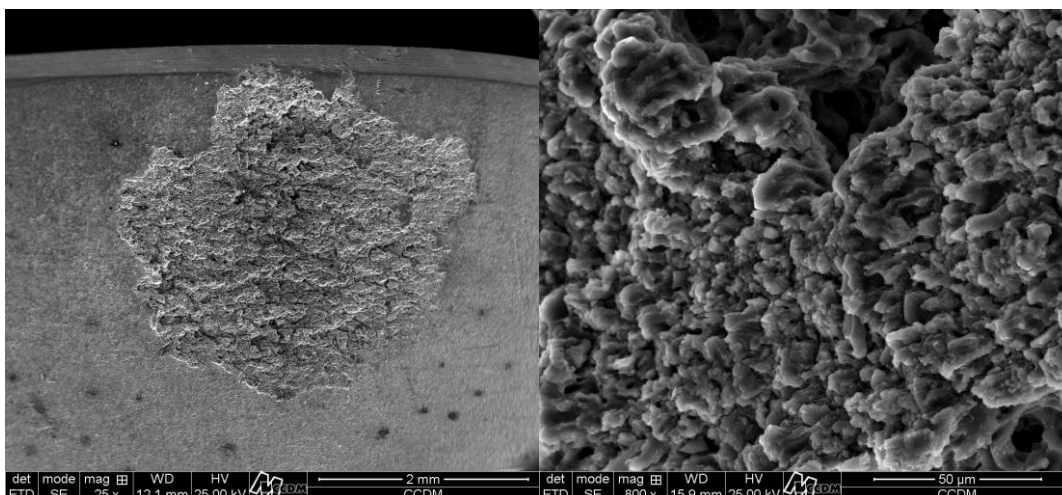


Figura 25: Imagem de MEV de região lateral da cabeça do pistão F2-2. Fonte: própria (2024).

#### 4.5 Espectroscopia por energia dispersiva (EDS)

A partir da seção transversal da amostra F2-1, foram realizadas microanálises para obtenção da composição química em pontos mais conservados, região interna do pistão. O resultado dessa análise é mostrado na tabela 2, onde pode-se observar que os elementos majoritários da liga são alumínio e silício com  $70,53 \pm 1,19$  e  $23,45 \pm 1,27$  respectivamente, seguidos por Cu com  $4,77 \pm 0,15$ .

Tabela 2: Composições químicas obtidas por microanálise de EDS (% massa).

Elemento	Mg	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Cu
Espectro 1	0.57	71.36	22.78	-	0.3	0.23	4.77
Espectro 2	0.63	70.33	23.82	-	0.31	0.25	4.65
Espectro 3	0.58	70.53	23.45	0.16	0.25	0.21	4.83
Espectro 4	0.58	72.66	21.47	0.19	-	0.17	4.93
Espectro 5	0.55	69.53	24.9	-	0.19	0.27	4.56
<b>Média</b>	<b>0.58</b>	<b>70.53</b>	<b>23.45</b>	<b>0.18</b>	<b>0.28</b>	<b>0.23</b>	<b>4.77</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>0.03</b>	<b>1.19</b>	<b>1.27</b>	<b>0.02</b>	<b>0.06</b>	<b>0.04</b>	<b>0.15</b>

#### 4.6 Simulações em TermoCalc

A partir da composição obtida, foram realizadas duas simulações termodinâmicas computacional com auxílio de software TermoCalc, para se obter o diagrama de solidificação da liga, no equilíbrio termodinâmico e fora, conforme mostram a Figura 26 e Figura 27.

TCAL7 : Al, Si, Mg, Mn, Cu

Pressure [Pa] = 100000.0, System size [mol] = 1.0, Mass percent Si = 23.45, Mass percent Mg = 0.58, Mass percent Mn = 0.28, Mass percent Cu = 4.77

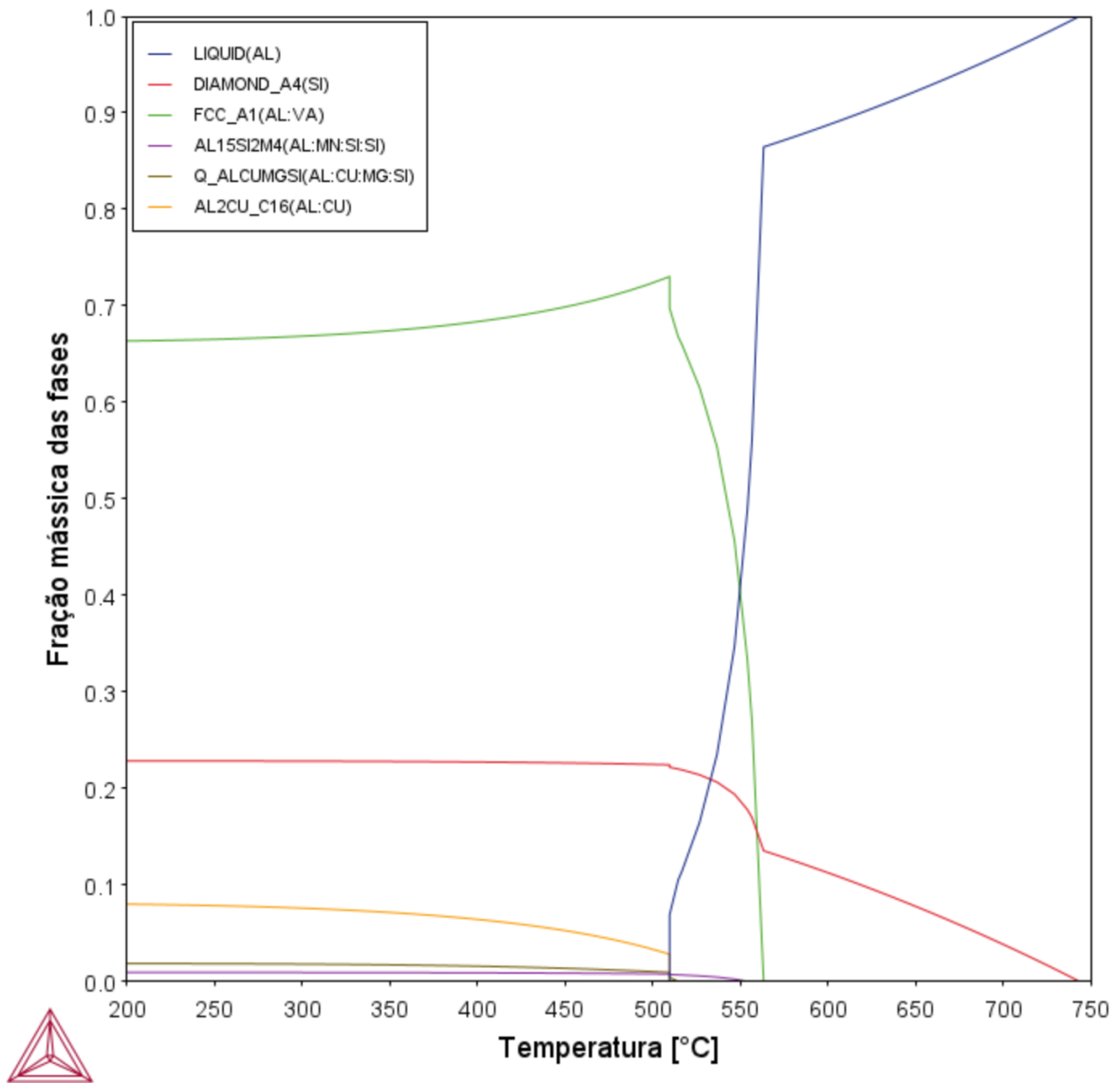


Figura 26: Diagrama de solidificação da liga do pistão, em equilíbrio termodinâmico, obtido por ThermoCalc (Banco de dados TCAL7: Al-Alloys v7.1) . Fonte: própria (2024).

TCAL7 : Al, Si, Mg, Mn, Cu

W(Si) = 23.45, W(Mg) = 0.58, W(Mn) = 0.28, W(Cu) = 4.77

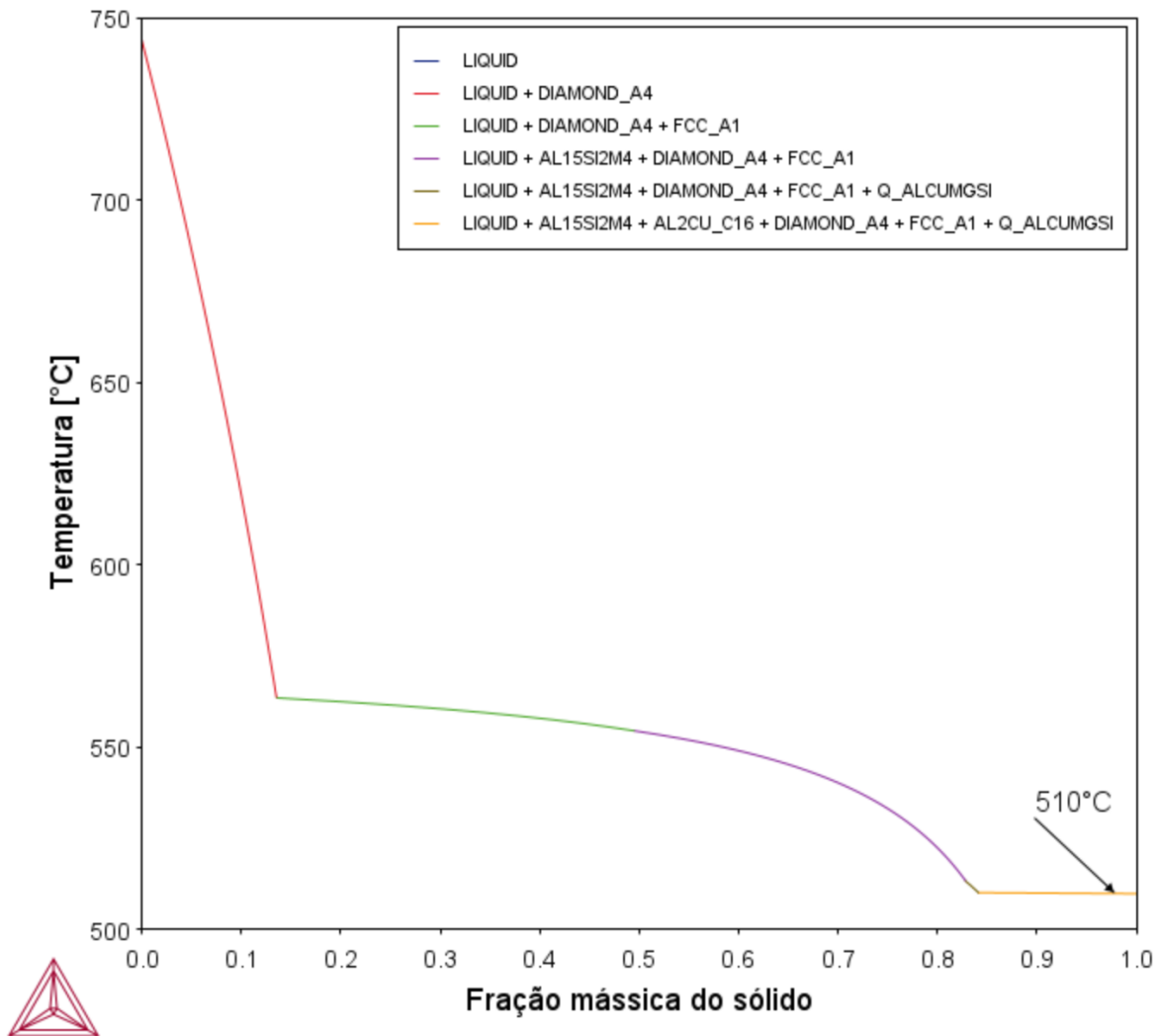


Figura 27: Diagrama Scheil de solidificação da liga do pistão, obtido por ThermoCalc (Banco de dados TCAL7: Al-Alloys v7.1) . Fonte: própria (2024).

#### 4.7 Microdureza Vickers.

Com o intuito de verificar impactos da mudança microestrutural observadas nas análises metalográficas, foram realizados ensaios de microdureza Vickers em cinco regiões distintas, fundo do pistão e saia, regiões com microestrutura menos afetada termicamente, preservando o que são esperadas como propriedades originais do material, meio 1 (região central da cabeça do pistão), meio 2 (região intermediária entre o centro do pistão e a borda) e região de arrancamento de material na borda do pistão, resultados mostrados na tabela 3.

Tabela 3: Medidas de microdureza Vickers obtidas a partir da amostra F1-3, (unidades em HV).

Medida	1	2	3	4	5	Média	Desvio Padrão
Fundo do pistão	139	144	138	144	140	140	2.8
Meio 1	115	112	119	119	118	118	3.0
Meio 2	110	116	107	112	112	112	3.3
Região de arrancamento	116	117	118	118	122	118	2.3
Saia	142	141	139	137	135	139	2.9

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Embora não tenha sido possível com base na literatura identificar uma liga utilizada comercialmente em pistões de motores à combustão interna com a composição obtida, ao analisarmos os três principais elementos de liga presente Si, Cu e Mg, com cerca de 23%, 5% e 0,6% respectivamente, como mostrado na tabela 2, é possível compreender o objetivo da composição.

Segundo o Herfurth & Scharf, (2021), a adição de silício em ligas de alumínio aprimora as propriedades de fundição, resultando em melhoras significativas na fluidez e resistência à fratura à quente, enquanto o cobre colabora no aumento da resistência e dureza nas condições de fundição e tratamento térmico. Ligas com teores de 4 a 6% de Cu apresentam uma resposta mais pronunciada ao tratamento térmico. Em termos gerais, a presença de cobre reduz a resistência à corrosão geral da liga e, em composições e condições específicas do material, aumenta a susceptibilidade à corrosão sob tensão, reduz a capacidade de fundição e diminui a resistência à fratura à quente. Por fim, o Mg desempenha um papel fundamental no desenvolvimento da resistência e dureza em ligas de Al-Si tratadas termicamente. Ele é amplamente utilizado em ligas mais complexas, que incluem cobre, níquel e outros elementos com o mesmo propósito. Composições típicas para alcançar altas resistências na família Al-Si costumam incorporar magnésio numa faixa de 0,40 a 0,70%. Além deste teor, não ocorre mais fortalecimento, resultando no amolecimento da matriz.

A partir destas informações, a liga se mostra uma escolha apropriada para fabricação de pistões de motores à combustão interna, por apresentar, além de boa fundibilidade, boa resistência a fluidez, dureza e resistência a trincas à quente.

Como pressuposto, era esperado que os pistões tenham falhado devido à falha do sistema de arrefecimento por subdimensionamento e ausência de um sistema de arrefecimento do ar admitido no sistema que sofre aquecimento, durante o processo de sobrealimentação via turbocompressão. Contudo, um estudo mais aprofundado das falhas encontradas nas 5 amostras obtidas, nos traz informações mais completas sobre os mecanismos envolvidos em cada uma das falhas. Sendo assim, é possível agrupar as falhas observadas em 3 principais categorias: falhas geradas por fusão (fusão da cabeça do pistão, fusão da cabeça dos pistões e da área dos anéis, arrancamento de material e microsolda), falhas geradas por desgaste (desgaste da saia do pistão), e, por fim, danos mecânicos.

Nos diagramas de solidificação obtidos por simulação termodinâmica, Figura 26 e Figura 27, em ambos os casos (no equilíbrio e fora do equilíbrio termodinâmico) observa-se uma temperatura sódus de aproximadamente 510°C, acima da qual ocorreria imediatamente o desaparecimento das fases  $AlCu$  e  $Al_2Cu$ , responsáveis pelo endurecimento de ligas Al-Si, como descrito (CAI; ZHAO; DING, 2017). O desaparecimento de fases Al-Cu são seguidas de uma queda abrupta da fração mássica da matriz  $\alpha$  (fase rica em alumínio), acompanhada de uma queda pequena da fração de  $\beta$  (fase rica em silício), enquanto a fração de líquido cresce até cerca de 560°C, onde coexistem apenas líquido e  $\beta$  (Silício sólido).

A região interna do pistão, por ser uma região resfriada, não pelo sistema de arrefecimento à água, mas sim pelo óleo do sistema de lubrificação, localizado abaixo dos pistões, apresenta o que é esperado como microestrutura do pistão fabricado, mostrada na Figura 21 (e), a saber: uma estrutura típica de liga Al-Si hipereutética (24% em peso de silício), com tratamento de refino do silício primário, semelhante ao obtido por (ZHANG et al., 2020) em liga similar, com 20% em peso de Si, com tratamento de refino de Si primário e alta taxa de resfriamento (16,3 K/min), mostrada na Figura 28. Já a Figura 29, nos mostra a mesma liga como fundida, com uma taxa de resfriamento muito inferior 3,3 K/min.

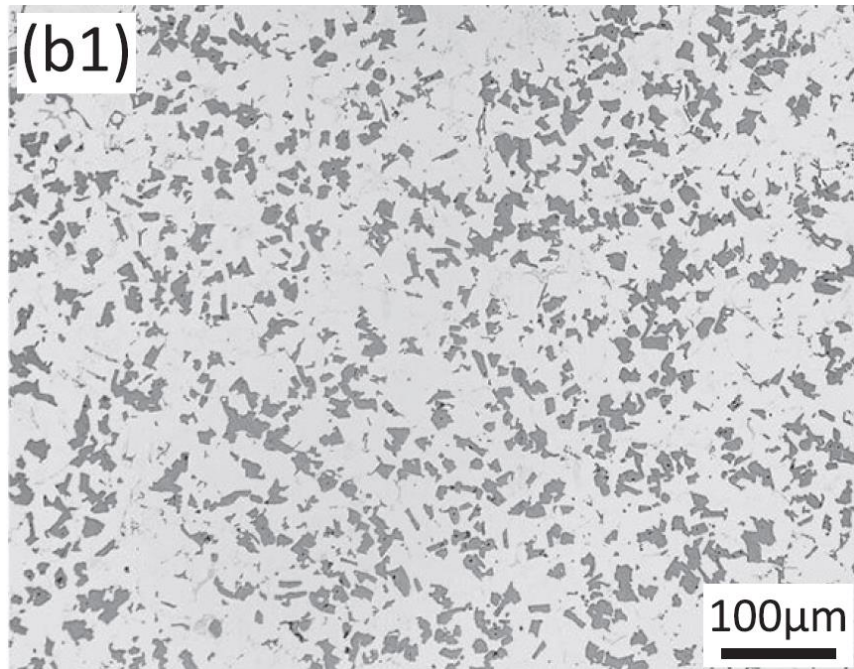


Figura 28: Liga Al-Si com Si primário refinado através de alta taxa de resfriamento. Fonte: modificado de ZHANG et al., (2020).

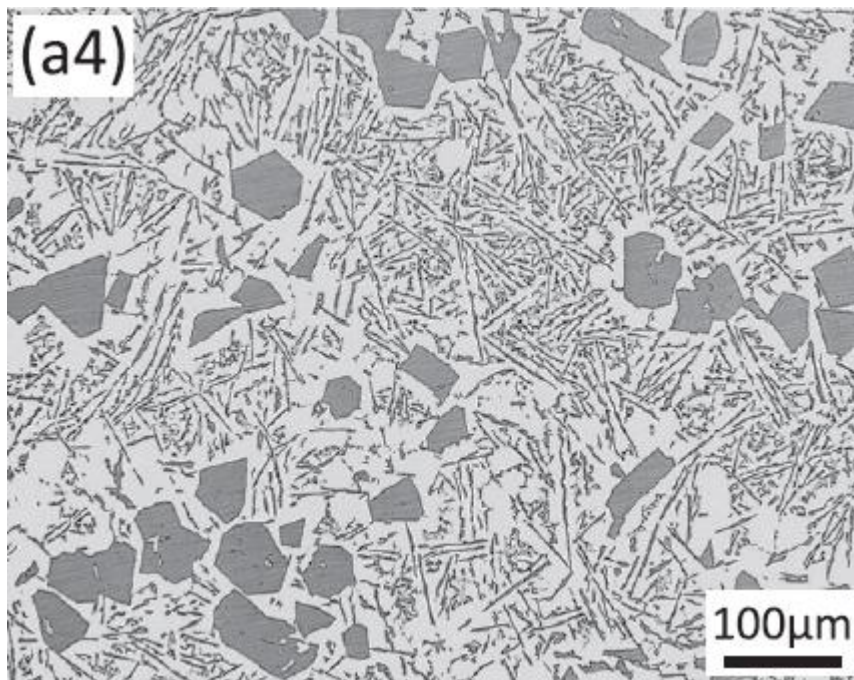
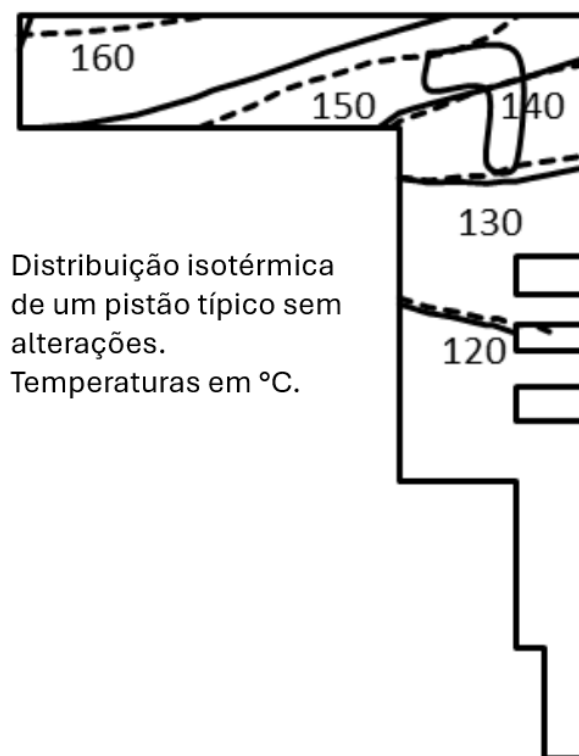


Figura 29: Estrutura de Al-Si (20% em massa), como fundida à taxa de resfriamento de 3,3 K/min. Fonte: modificado de L zang (2020).

As demais imagens da Figura 21 mostram as regiões central da cabeça do pistão (a), lateral da cabeça do pistão (b) região dos anéis (c) e saia do pistão (d), para um mesmo aumento, onde é possível observar que enquanto as regiões central e saia do pistão mantêm uma microestrutura mais próxima à esperada como original, a região lateral da cabeça e dos anéis apresentam um tamanho médio da fase de Si

maior e fases aciculares, indicando crescimento desta fase no entorno da cabeça do pistão, se aproximando mais da estrutura de Al-Si hipereutética, na liga como fundida à uma taxa de resfriamento baixa. Este fenômeno pode ser explicado devido ao calor fornecido nestas regiões, permitindo a mobilidade do Si na liga, facilitando seu coalescimento e formação de fases aciculares mais termodinamicamente estáveis.

A alteração microestrutural das regiões lateral da cabeça pistão contraria ao estimado por (SHARMA; SAINI; SAMRIA, 2015), dentre outras bibliografias, que afirmam maior temperatura média no centro da cabeça do pistão, mostrado na Figura 30. Além disso, essa alteração microestrutural evidencia que a temperatura da câmara de combustão excedeu a temperatura na parede de aproximadamente 176°C e 225°C no centro da câmara, como é estimado por ANGELBERGER; POINSOT; DELHAY, (1997).

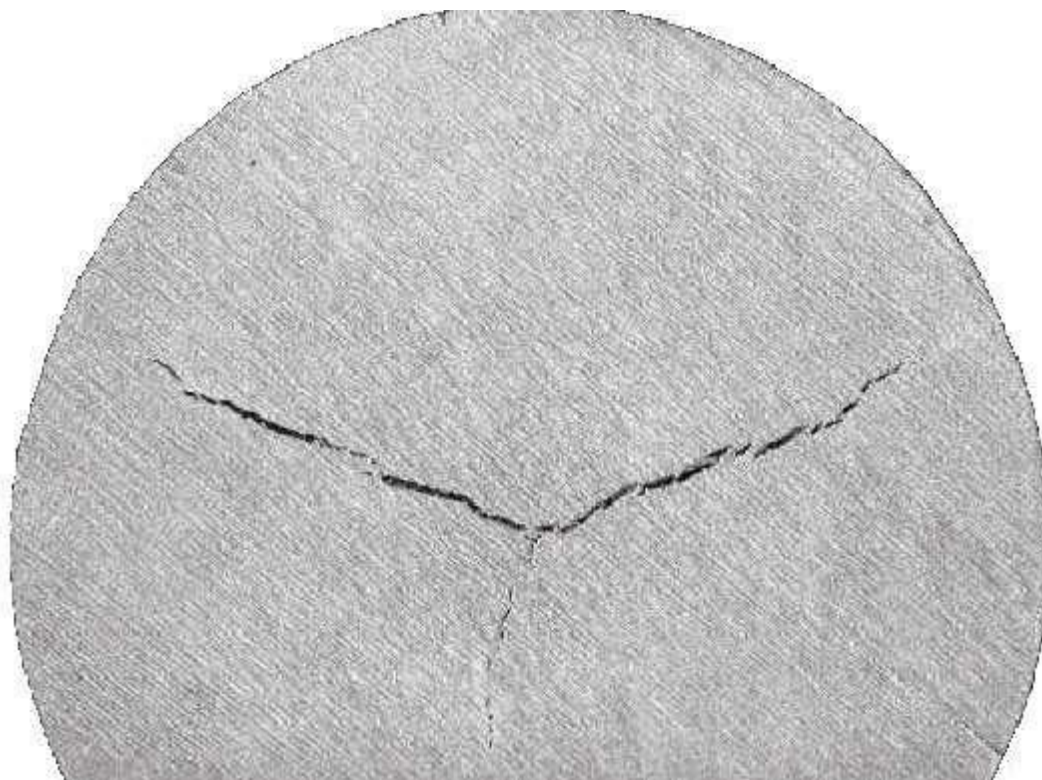


*Figura 30: Distribuição de temperaturas em um pistão em funcionamento modificado de SHARMA; SAINI; SAMRIA (2015).*

O coalescimento da fase de Si indica a ocorrência de um gradiente térmico na câmara de combustão da camisa em relação ao centro, com a região da camisa do cilindro sendo mais quente.

A Figura 22 mostra diferentes pontos da região lateral da cabeça do pistão F2-1, com diferentes estágios de fusão gradativa, inclusive com a formação de vazios no entorno de partículas de silício, até vazios semelhantes começarem a se formar subsuperficialmente em torno de outras partículas, as destacando da matriz de alumínio. Esses vazios em torno das partículas de silício indicam que a fusão da matriz  $\alpha$ , prevista em simulação, deve ter iniciado primeiramente na região de interface  $\alpha$ - $\beta$ , por serem um sítio de maior energia livre, além de a diferença entre coeficientes de expansão do alumínio com cerca de  $25 * 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (CALLISTER; RETHWISCH, 2018), quase dez vezes maior do que a do silício com  $2,6 * 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (calculado a partir de (ZHANG et al., 2020) gerar tensões tratativas na interface  $\alpha$ -  $\beta$ , favorecendo o destacamento das partículas de silício da matriz.

Na Figura 23 são mostrados diferentes pontos da região de arrancamento de material da amostra F1-3, onde é possível observar a existência de trincas próxima ao perfil de fratura, semelhante a trincas a quente observadas em ligas de alumínio, como as mostradas por (POLYTECHNIQUE; DE LAUSANNE, 2007) e (QIAN et al., 2017) (Figura 31 e Figura 32).



*Figura 31: Trinca a quente em uma peça de alumínio alta resistência, fundida. (POLYTECHNIQUE; DE LAUSANNE, 2007).*

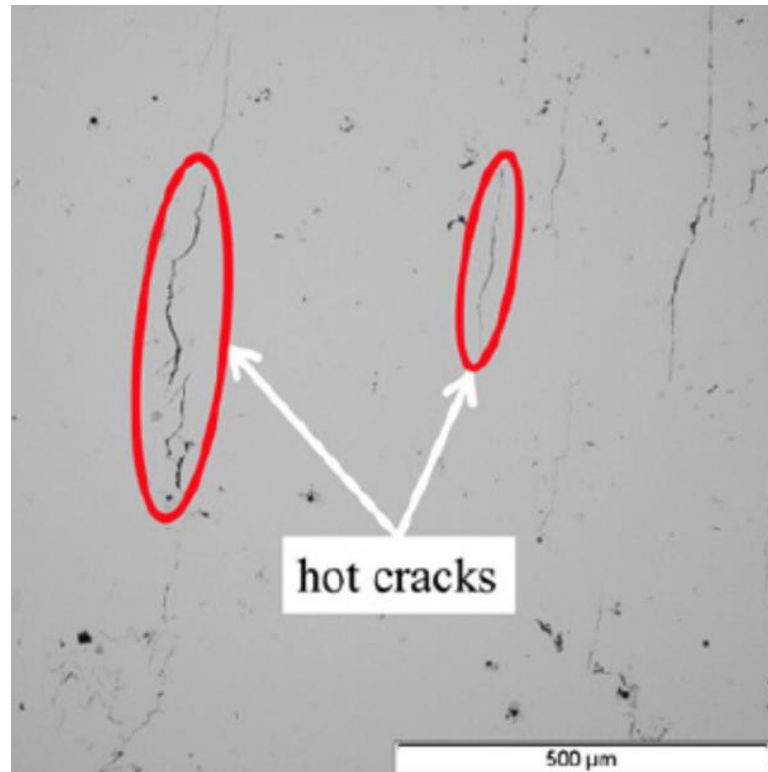
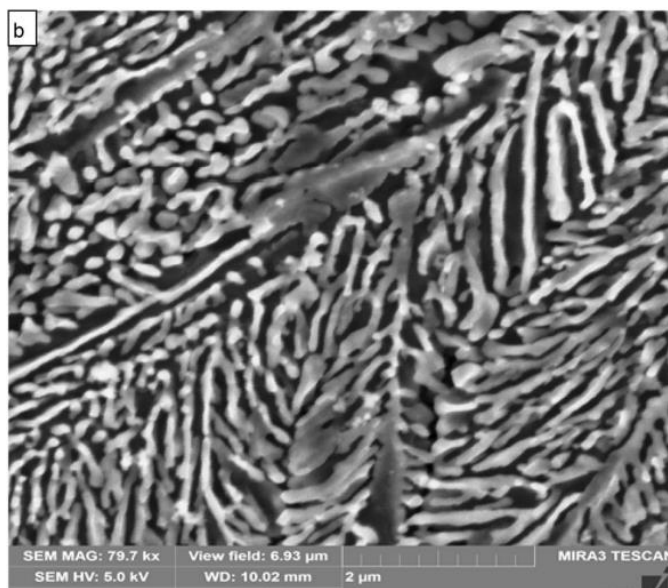


Figura 32: Imagem de microscópio óptico de trinca a quente em liga de AA-7075 (ABOULKHAIR et al., 2019).

As imagens obtidas da região superior da cabeça do pistão F2-2, Figura 24, e lateral, Figura 25, obtidas por microscopia eletrônica de varredura, por apresentar aspecto semelhante ao observado em estudos como o de (ABBOUD; MAZUMDER, 2020) onde foi observada a estrutura do silício em ligas hipereutéticas de Al-Si após *Deep Etching* (com remoção da matriz de Al- $\alpha$ , Figura 33), corroboram com fenômeno observado através de microscopia óptica, onde observa-se, na região lateral da cabeça do pistão, figuras Figura 24 e Figura 25, a fusão parcial da liga, apresentando evidências de que a porosidade aparente observada na análise visual é resultado de uma fusão dinâmica específica e progressiva da matriz de Al- $\alpha$ , deixando partículas de silício expostas.



*Figura 33: Imagem obtida por MEV de amostra de liga Al-Si hipereutética após deep etching. Fonte:(ABBOUD; MAZUMDER, 2020).*

Ao combinar as informações obtidas por metalografia, microscopia eletrônica de varredura com as simulações realizados, é possível validar a preposição de que a falha dos pistões foi de fato, consequência da falha do sistema de arrefecimento, apresentando desempenho inferior ao necessário, dada a ausência de um sistema de arrefecimento dos gases admitidos pelo sistema. Devido a isto, houve um crescimento gradual da temperatura na camisa do cilindro e, conseqüentemente, da temperatura média da câmara de combustão, fato evidenciado pelo coalescimento da fase  $\beta$  (rica em silício), levando ao crescimento destas partículas na liga na região lateral do pistão e anel superior. Pelas simulações realizados, o incremento de temperatura levaria à solubilização ou fusão de partículas como as de Al-Cu, responsáveis pelo endurecimento da liga. O crescimento de partículas de Si e a solubilização de precipitados na liga, resultam em um amolecimento localizado da cabeça e lateral do pistão e da região do anel superior de vedação, evidenciado pelo ensaio de dureza Vickers (Tabela 3), onde observa-se que a dureza da liga originalmente se encontra em torno de 140HV, dureza ainda presente em fundo e saia de pistões falhados, enquanto que a região superior do pistão apresenta dureza entre 112 e 118HV. Este processo de amolecimento devido aquecimento se manteve até a temperatura aproximada de 510°C, quando se inicia a fusão da matriz de alumínio, levando ao destacamento da fase  $\beta$  da matriz. Fatos que, combinados com a dilatação térmica

do conjunto, e, conseqüentemente do atrito com a camisa do cilindro, favorecem o arrancamento de material por meio de fratura plástica a quente.

A microsolda observada nos anéis superiores de vedação se caracteriza pela deposição de material na parte superior do anel, bloqueando o movimento deles em torno no pistão, ilustrados na Figura 18.

Ao considerar a definição proposta pela SAE (SHUSTER et al., 1996a), que a microsolda é a "coesão localizada de metais ou não-metais produzida pelo aquecimento dos materiais a temperaturas adequadas, com ou sem a aplicação de pressão, ou pela aplicação de pressão sozinha e com ou sem o uso de material de enchimento", podemos definir a microsolda observada como consequência de um processo de fusão específico, resultando na deposição de fração da liga de alumínio do pistão sob o anel superior, o que gerou as regiões com microsoldagem.

No que diz respeito ao desgaste da saia do pistão, como afirmado por LI, (1982), é algo inerente ao funcionamento do motor, mas fatores como calor excessivo podem acelerar o processo, reduzindo a vida útil do componente.

A presença de evidências de desgastes mais acentuados nas amostras da falha 1, mais especificamente como os da amostra F1-4, Figura 16 (d), vai ao encontro de danos por fusão mais severos na falha 1, dado o maior tempo de exposição ao calor excessivo, responsável pela falha. O desgaste prematuro observado na saia do pistão também é atribuído à elevação da temperatura média dentro da câmara de combustão.

Dada à presença de filtros, tanto na linha de combustível, quanto na admissão do motor em toda sua vida em serviço, e a ausência de evidências de falha em outros componentes que não o pistão ou anéis, pode-se pressupor que o material que tenha dado origem às indentações encontradas no pistão F2-1 foi originado do desprendimento de material do próprio pistão que, com o movimento contínuo do pistão, levou à formação de indentações na região superior do pistão, até que o material tenha sido expelido da câmara. Embora não tenha sido possível observar indicações de danos causados às câmaras de combustão por materiais desprendidos do pistão, por falta de viabilidade de análises de maior magnificação sem gerar danos permanentes ao motor, o material desprendido no processo da falha apresenta risco

ao sistema em funcionamento e por não ter sido encontrado antes da substituição dos pistões, sua eliminação deve ter se dado por via do sistema de exaustão.

Por fim, as análises mostraram que defeitos descritos na literatura como críticos, como microsolda em anéis de pistões e danos mecânicos, em determinados casos, acabam por ser consequência de defeitos menos graves, como a fusão da cabeça do pistão que, embora leve à perda instantânea de potência, não leva ao travamento do sistema ou falha catastrófica do motor, ao contrário de falhas como a microsolda que pode levar ao bloqueio do movimento dos pistões, travamento de virabrequim e consequentemente falhas muito mais severas do sistema.

## **6 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Pelos exames realizados no presente trabalho, conclui-se que as falhas se deram devido à ineficácia do sistema de arrefecimento que, em caso contrário, não desenvolveria as fusões e desgastes identificadas em pistões e anéis de vedação. Além disto, foi possível através deste estudo de caso, obter uma melhor compreensão de aspectos metalúrgicos envolvidos em falhas comumente relatadas na literatura como a fusão de cabeça de pistão. As análises revelaram que problemas identificados na literatura como sendo críticos, tais como microsoldas nos anéis dos pistões e danos mecânicos, em certos casos, acabam sendo resultantes de defeitos menos significativos, como a fusão da cabeça do pistão. Embora esse último cause uma perda imediata de potência, não resulta no travamento do sistema ou em uma falha catastrófica do motor, ao contrário de falhas como a microsolda, que pode levar ao bloqueio do movimento dos pistões, resultando em falhas muito mais severas no sistema. Tais defeitos são consequência de um fenômeno dinâmico de fusão progressivo específico, onde há a fusão gradual de fases particulares da liga do pistão, levando ao desprendimento de material e adesão em outros componentes como os anéis de vedação e camisa do pistão, podendo bloquear o movimento de partes móveis do motor e, consequentemente, levar a falha catastrófica do mesmo, como quebra do bloco, bielas, virabrequins, entre outros. Apesar de não ter sido viável identificar sinais de danos nas câmaras de combustão, devido a materiais liberados

pelo pistão, ainda é possível se afirmar que o material desprendido no processo da falha apresenta grandes riscos ao sistema em funcionamento.

## REFERÊNCIAS

**Turbocharger Market Size To Hit USD 64.69 Billion By 2032.** Disponível em: <<https://www.precedenceresearch.com/turbocharger-market#:~:text=The%20global%20turbocharger%20market%20size>>. Acesso em: 17 jan. 2024.

ABBOUD, J.; MAZUMDER, J. Developing of nano sized fibrous eutectic silicon in hypereutectic Al–Si alloy by laser remelting. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–18, 2020.

ABOULKHAIR, N. T. et al. 3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting. **Progress in Materials Science**, v. 106, n. May, p. 100578, 2019.

ANGELBERGER, C.; POINSOT, T.; DELHAY, B. Improving near-wall combustion and wall heat transfer modeling in SI engine computations. **SAE Technical Papers**, 1997.

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna - Volume 1**. 2. ed. [s.l.] Blucher, 2013. v. 1

CAI, Z.; ZHAO, J.; DING, H. ASM Handbook 4 - Heat Treating. **Rolling of Advanced High Strength Steels: Theory, Simulation and Practice**, v. 4, p. 289–322, 2017.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais Uma introdução. Ciência e engenharia de materiais : uma introdução**, 2018.

HERFURTH, K.; SCHARF, S. ASM Handbook 15 - Casting. **Springer Handbooks**, p. 325–356, 2021.

LI, C. H. Piston thermal deformation and friction considerations. **SAE Technical Papers 820086**, 1982.

POLYTECHNIQUE, É.; DE LAUSANNE, F. A granular model of solidification as applied to hot tearing. n. January 2007, 2007.

QIAN, D. et al. Statistical study of ductilitydip cracking induced plastic deformation in polycrystalline laser 3D printed Ni-based superalloy. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1–9, 2017.

SHARMA, S. K.; SAINI, P. K.; SAMRIA, N. K. Computational modeling of temperature field and heat transfer analysis for the piston of diesel engine with and without air cavity. **Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering**, v. 9, n. 2, p. 139–147, 2015.

SHUSTER, M. et al. Piston ring microwelding phenomenon and methods of prevention. **SAE Technical Papers**, n. 412, 1996a.

SHUSTER, M. et al. Piston ring microwelding phenomenon and methods of prevention. **SAE Technical Papers**, n. 412, 1996b.

TOMASZ, A.; PIOTR, Ł. Selected failures of internal combustion engine pistons. **Logistyka**, v. 3, p. 48–55, 2015a.

TOMASZ, A.; PIOTR, Ł. Selected failures of internal combustion engine pistons. **Logistyka**, v. 3, p. 48–55, 2015b.

ZHANG, L. et al. Formation mechanism and conditions of fine primary silicon being uniformly distributed on single  $\alpha$ Al matrix in Al-Si alloys. **Materials and Design**, v. 193, p. 108853, 2020.

ANDERSSON J.O., Helander T., Höglund L., Shi P.F., and Sundman B., (2002). Thermo-Calc version 2021a and DICTRA, **Computational tools for materials science. Calphad**, 26, 273-312.