DECROO DECADO INDVAÇÃO NAS EMPRESAS DE METALURGIA E METALOMECÂNICA

Abril | Maio | Junho | 2025

7,50€

Inovação no ensino do design e valorização da sustentabilidade: o impacto da Blue Design Alliance

PROJETO CARBONFREE_GUIDE4METAL Estratégia de descarbonização e economia circular - Setor Metal Portugal

Conferência Anual AIMMAP "Efeito+" reuniu Empresários e Entidades



Trabalhos práticos de materiais metálicos na Licenciatura em Engenharia Mecânica da FEUP Identificação de Componentes numa Válvula de Escape

Autores: Margarida Guerreiro, Miriam Marques (Estudantes Licenciatura em Eng. Mecânica da FEUP), Rui Neto, Jorge Lino Alves (Docentes FEUP)

RESUMO

Captar a atenção dos estudantes nas aulas teóricas e práticas é um desafio cada vez maior à criatividade e à exploração de todas as ferramentas experimentais e digitais atualmente existentes. Na Unidade Curricular de Materiais Metálicos, da Licenciatura em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, as aulas práticas são estruturadas em torno de um trabalho experimental onde os estudantes têm a oportunidade de efetuar caracterização microestrutural, estudar o efeito de tratamentos térmicos e realizar ensaios mecânicos para estudar o material que lhes foi fornecido. Este trabalho experimental, embora muito exigente, é bastante apreciado pelos estudantes, levando a uma grande motivação para a aprendizagem e a uma adesão incomum que se reflete nas classificações finais.

Este artigo tem como objetivo apresentar a sequência experimental realizada para identificar os componentes presentes numa válvula de escape, utilizada num motor de um navio. Recolheu-se informação geral sobre as válvulas de escape: funcionalidade, principais geometrias e os materiais mais utilizados na sua construção. Já com alguns candidatos, retiraram-se amostras das regiões onde se previa encontrar materiais dissimilares. Analisaram-se microestruturas e mediram-se durezas, conseguindo assim definir com mais precisão as possibilidades dos materiais presentes na peça. Definiram-se tratamentos térmicos e ensaios dilatométricos, e após a sua realização prepararam-se novas amostras, reanalisando a sua microestrutura e dureza, e reduzindo as opções possíveis para a proposta dos materiais que foram utilizados no fabrico da válvula.

INTRODUÇÃO

A Unidade Curricular (UC) Materiais Metálicos, com 6 ECTS (Sistema Europeu de Transferência e Acumulação de Créditos, 162h), é lecionada no primeiro semestre do segundo ano da Licenciatura em Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Esta UC tem cerca de 250 estudantes, e compreende 2h de aulas teóricas (divididas em 2 turnos) e 2h de aulas práticas laboratoriais (10 turmas de 24 estudantes), sendo as aulas teóricas lecionadas pelo regente da UC, e as aulas práticas lecionadas por 5 docentes doutorados. Nas aulas práticas são constituídos grupos de 3 estudantes. No ano letivo de 2024/25 cada grupo foi confrontado com a realização de um dos seguintes trabalhos:

- 1. Ensaio Jominy;
- 2. Recozido de Normalização;
- 3. Recozido de Amaciamento;
- 4. Têmpera Bainítica;
- 5. Têmpera Martensítica e Revenido;
- 6. Identificação de componentes.

Este tipo de atividade tem como objetivo captar a atenção e motivar a presença dos estudantes nas aulas práticas lecionadas, permitindo-lhes um contacto direto com uma forte componente experimental, consolidando os conhecimentos adquiridos nas aulas teóricas [1-2]. Os estudantes devem efetuar sozinhos (com o apoio dos docentes e da técnica do laboratório) todo o trabalho experimental, elaborar um relatório e um poster e fazer uma apresentação pública no final do semestre.

Para a realização dos trabalhos são fornecidos a cada grupo várias amostras de um aço do catálogo da Ramada Aços (Ovar). A Ramada colabora com esta UC há mais de quarenta anos, proporcionando todos os anos uma visita técnica às suas instalações (os estudantes são divididos em dois grupos) para consolidação dos conteúdos programáticos e esclarecimento de dúvidas acerca dos aços que com que estão a trabalhar. A Figura 1 documenta momentos da visita do ano letivo de 2024/25.



Figura 1: Visita de estudo à Ramada Aços

As opções sugeridas para os diferentes trabalhos práticos foram as apresentadas na Tabela 1, tendo sido escolhida para este trabalho a identificação de componentes.

Tabela 1: Trabalhos elaborados no âmbito da UC Materiais Metálicos no ano letivo de 2024/25

| Trabalho | Componente |
|------------------|---------------------------------|
| | Chave de Bocas (A) |
| | Mola suspensão de camião |
| | Roda dentada bicicleta (B) |
| | Lamina de corte de couro (C) |
| | Lima (D) |
| | Chave de pneus (E) |
| | Engrenagem (F) |
| IDENTIFICAÇÃO | Válvula de escape (G) |
| COMPONENTES | Veio + turbina |
| | Chave Inglesa (H) |
| | Formão (I) |
| | Árvore de Cames |
| | Espada (J) |
| | Engrenagem BMW (K) |
| | Mola suspensão (L) |
| | Pista simples |
| | Biela pistão |
| | Disco de corte |
| JOMINY | |
| NORMALIZAÇÃO | |
| AMACIAMENTE | |
| TEMPERA BAINITIC | CA |
| TEMPERA + REVEN | IDO |

Neste tipo de trabalho, os estudantes podem selecionar um componente existente no laboratório ou podem trazer o seu próprio componente. Os docentes incentivam este tipo de atividade, que apesar de ser mais trabalhosa, é sempre um novo desafio, ao contrário dos outros temas onde é sempre possível encontrar informações de anos anteriores [1-2].

Neste trabalho identificaram-se os materiais presentes numa válvula de escape retirada do motor de uma embarcação [3]. As válvulas de escape são componentes do motor que têm como função permitir a expulsão dos gases de escape. Nestas é possível distinguir 3 regiões principais: a face que contacta com a sede, a cabeça e a haste (Figura 2(a)). Verificou-se, tanto pelo facto de apenas numa das regiões se encontrar magnetismo, como pelas diferentes reações a ataques químicos, que a cada geometria correspondia um material diferente e por isso retiraram-se amostras de cada zona.

O processo de montagem das amostras de cada material comeca com o corte destas na dimensão pretendida e a sua montagem em resina, para facilitar o seu manuseio durante as etapas seguintes. Com o objetivo de remover as imperfeições e riscos causados pelo corte inicial, usaram-se lixas de diferentes granulometrias (#80, 180, 320 e 800) e desbastaram-se as amostras para remover o excesso de material e obter uma superfície plana. De modo a tornar a superfície lisa e brilhante utilizaram-se abrasivos finos (alumina e diamante), aplicados em discos de feltro rotativos. Para revelar a microestrutura efetuaram-se ataques metalográficos. Para análise das secções da haste e cabeca da válvula, recorreu--se a Super Picral (20 g de ácido pícrico e 100 ml de HCl). A região da face que contacta com a sede não era atacada, sendo por isso utilizado Kalling's no. 2 (5g de CuCl, 100 ml de etanol e 100 ml de ácido clorídrico).

Após esta fase, mediram-se as durezas e observou-se a microestrutura para se poder iniciar a previsão do material de cada amostra. Já nesta fase inicial concluiu-se que apenas seria possível realizar tratamentos térmicos a uma das sec-



Figura 2: (a) Geometria da válvula de escape; (b) Cabeça do motor Cummins NTA 855 [4]

ções da peça - a secção correspondente ao material 3. Desta região, retiraram-se então mais 2 amostras, que seriam utilizadas para realizar um ensaio dilatométrico (identificar os pontos de mudança de fase: Ac1, Ac3, Ar1 e Ar3) e posteriormente efetuar uma têmpera martensítica.

Mediu-se a dureza após-têmpera e após o ensaio dilatométrico, observaram-se as suas microestruturas e compararam-se com o indicado nos diagramas TRC (diagrama de transformação por arrefecimento contínuo) dos aços previstos.

Relativamente aos materiais que não foram submetidos a tratamentos térmicos, apenas foi possível realizar a sua identificação através da pesquisa bibliográfica, medição da dureza e a microestrutura observada dos materiais mais usuais em válvulas de escape.

RESULTADOS E DISCUSSÃO MATERIAL 1 - FACE QUE CONTACTA COM A SEDE DA VÁLVULA

Os mecanismos de desgaste da face que contacta com a sede resultam de uma combinação complexa de desgaste abrasivo, transferência de material entre superfícies, deformação plástica e oxidação [5]. Consequentemente, os materiais que constituem esta face devem possuir elevada dureza, resistência ao desgaste, à oxidação e às elevadas temperaturas de serviço. Para além disso, devem ter uma excelente condutividade térmica, uma vez que cerca de 75% do calor da válvula é transportado através da sede para os canais de refrigeração [6].

Para esta aplicação os materiais mais utilizados são superligas como a Stellite 6 e o Inconel 718, de composições representadas nas Tabelas 2 e 3.

| Tabela 2: | Composição | da Stellite | 6 (Granta | EduPack | 2024) |
|-----------|------------|-------------|-----------|---------|-------|
|-----------|------------|-------------|-----------|---------|-------|

| Composição Química (%) | Co | Cr | W | Fe | Ni | Si | С |
|---------------------------|----------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Stellite 6 | Restante | 27-32 | 4-6 | 3-4 | 3-4 | 1-2 | 1-2 |

Tabela 3: Composição do Inconel 718 (Granta EduPack 2024)

| Composição Química (%) | Ni | Cr | Fe | Мо | Nb | Та |
|---------------------------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|
| Inconel 718 | 50-55 | 17-21 | 11-25 | 2,8-3,3 | 2,4-2,8 | 2,4-2,8 |

A Tabela 4 apresenta os valores de dureza dos dois candidatos, verificando--se que o valor obtido no material 1 integra tais intervalos.

Tabela 4: Dureza estimada dos candidatos (Granta EduPack 2024) e dureza do material 1 (HV40)

| Materiais | Stellite 6 | Inconel 718 | Material 1 |
|---------------|------------|-------------|------------|
| Dureza [HV40] | 380-490 | 400-500 | 443 |

Através da microestrutura obtida (Figura 3) foi possível eliminar o Inconel 718 como candidato, uma vez que a microestrutura do Inconel consiste numa matriz supersaturada sólida de Ni, Cr e Fe, dispostos em maclas (Figura 4(a)) [7]. A composição química da stellite ó (Tabela 2) complementa a microestrutura (Figura 4b)). Esta consiste numa solução sólida de Co (região clara) distribuída em dendrites (estrutura CFC) e interdendrites formadas a partir de Co eutético e Cr, com carbonetos de crómio (região escura) - estrutura HC [10].

MATERIAL 2 -CABEÇA DA VÁLVULA

A cabeça da válvula está diretamente exposta à combustão, tendo que suportar temperaturas que variam entre os 750°C e 950°C, e resistir a gases de combustão ricos em óxidos de carbono, azoto e enxofre e a elevadas pressões, devendo responder a estas solicitações sem que ocorram deformações permanentes [11]. Os materiais que compõem esta região devem possuir elevada resistência térmica, elevada resistência à corrosão, à oxidação e ao desgaste. Adicionalmente, verificou-se que este material



Figura 3: Microestrutura do material 1 atacado com Kalling's no. 2



Figura 4: (a) Microestrutura do Inconel 718 [8]; (b) Microestrutura da Stellite 6 [9]

| Composição Química (%) | С | Si | Mn | Cr | Ni | Ν |
|------------------------|--------------|--------------|---------------|----------------|--------------|--------------|
| AISI 21-2N | 0,50 0,60 | ≤0,25 | 7,00 9,50 | 19,50 21,50 | 1,50 2,75 | 0,20 0,40 |
| AISI 21-4N | 0,48 0,58 | ≤0,25 | 8,00 10,00 | 20,00 22,00 | 3,25 4,50 | 0,35 0,50 |
| AISI 23-8N | 0,28 0,38 | 0,50 1,00 | 1,50 3,50 | 22,00 24,00 | 7,00 9,00 | 0,25 0,35 |

Tabela 5: Composição química de aços inoxidáveis possíveis [14]

[⇒]GESTÃO & TECNOLOGIAS

não apresenta magnetismo, e para esta aplicação são pouco utilizadas ligas de níquel (Inconel) [12].

Os aços inoxidáveis 21-2N, 21-4N e 23-8N (AISI), cuja composição consta na Tabela 5, são tipicamente utilizados nesta aplicação e permitem cumprir os requisitos elencados [13].

A Tabela 6 apresenta as durezas previstas para cada um dos candidatos. Verifica-se também que a dureza obtida para o material 2 está enquadrada nestes valores.

A curva obtida no ensaio dilatométrico (Figura 5) é característica de um aço austenítico, uma vez que não apresenta inflexões correspondentes à transformação de ferrite em austenite. Por não existirem temperaturas de transição, não foi possível recorrer a nenhum tratamento térmico para melhor identificar este material.

A Figura 6 mostra a microestrutura deste material, que consiste numa matriz de grãos austeníticos heterogéneos com carbonetos dispersos pelas juntas de grão.

Uma vez que todos os aços possíveis apresentam elevadas percentagens de Cr, os carbonetos de crómio apresentam-se) sob a forma globular, que se formam maioritariamente nas juntas de grão porque a razão C/Cr é superior nesses locais.

O Ni e o Mn são estabilizadores da fase austenítica (gamagenos), pelo que favorecem a precipitação de carbonetos reduzindo a sua solubilidade na matriz [9]. Os carbonetos atuam como inibidores do crescimento do grão da austenite, uma vez que, nas regiões com maior concentração de carbonetos, o tamanho do grão é menor. Este mecanismo permite uma microestrutura mais fina que se opõe ao movimento de deslocações, aumentando a resistência mecânica deste aço [15].

| Materiais | Materiais AISI 21-2N | | AISI 23-8N | Material 2 | |
|---------------|----------------------|---------|------------|------------|--|
| Dureza [HV40] | 302-392 | 302-392 | 266-392 | 340 | |

Tabela 6: Durezas estimada dos candidatos [14] e dureza do material 2 (HV40)



Figura 5: Ensaio dilatométrico do material 2



Figura 6: Microestrutura do material 2 (ataque com Super Picral)

Dadas as composições de Mn e Ni dos aços e sabendo que o Mn apresenta um menor efeito estabilizador que o Ni [16], verifica-se que o tamanho de grão segue a seguinte relação AISI 21-2N>AISI 21-4N>AISI 23-8N, uma vez que a quantidade de carbonetos aumenta de acordo com a seguinte sequência AISI 21-2N<AISI 21-4N<AISI 23-8N. Posto isto, o aço que melhor representará a microestrutura apresentada é o AISI 21-4N.

MATERIAL 3 - HASTE DA VÁLVULA

A haste da válvula move-se dentro de uma guia (Figura 7), estando sujeita a atrito constante e a tensões cíclicas impostas pela carga da mola de retorno e pela pressão dos gases de combustão. Estes fatores, aliados ao sobreaquecimento, tornam esta região a mais suscetível a falhas por fadiga por ocorrerem deposições irregulares de carbono na face que contacta com a sede, deposições estas que causam uma grande amplitude de tensões de flexão na haste [17]. Para além disso, esta secção é magnética, pelo que os aços inoxidáveis, em particular, os martensíticos, surgem como os melhores candidatos para esta aplicação [12, 13].



Figura 7: Representação esquemática da haste no interior da guia [18]

| T 7 | ~ · ~ | / · / | · · · / / · | / · [14] |
|-----------|------------|-----------|--------------------|------------------------|
| labela /: | Composicao | aumica de | s acos inoxidaveis | possiveis 4 |
| | | | | Le + + + + + + + + - 1 |

| Composição Química (%) | С | Si | Mn Max | Cr | Ni Max | Мо |
|---------------------------|--------------|--------------|-----------|----------------|-----------|--------------|
| X45CrSi9-3 | 0,40 0,50 | 2,75 3,75 | 0,80 | 7,50 9,50 | 0,50 | - |
| X40CrSiMo10-2 | 0,35 0,45 | 1,80 2,50 | 0,60 | 10,00 12,00 | 0,60 | 0,70 1,30 |
| X10Cr13 | 0,12 | Max 1,00 | 1,50 | 12,50 | - | - |
| X20Cr13 | 0,20 | Max 1,00 | 1,50 | 13,00 | - | - |

Tabela 8: Dureza estimada dos possíveis aços candidatos [20] e dureza obtida (HV40)

| Materiais | X45CrSi9-3 | X40CrSiMo10-2 | X10Cr13 | X20Cr13 | Material 3 |
|------------------|------------|---------------|---------|---------|------------|
| Dureza [HV40] | 286-392 | 279-513 | 276-327 | 318-368 | 336 |



Figura 8: Curva dilatométrica do material 3

Na Tabela 7 apresentam-se os aços selecionados: X45CrSi9-3, X40CrSiMo10-2, X10Cr13 e X20Cr13 (Norma Europeia -EN), assim como a respetiva composição química. Os diagramas TRC correspondentes encontram-se em anexo (Anexos 1 e 2).

Para este material foram realizadas 3 análises:

1. ESTADO DE FORNECIMENTO

Neste estado, o aço deverá apresentar--se no estado tratado. A dureza difere consoante a temperatura do revenido, no entanto, sabe-se que para os aços inoxidáveis martensíticos, o revenido é frequentemente realizado a temperaturas superiores à temperatura máxima de serviço desse aço (aproximadamente 540°C) [19].

Recorrendo às curvas de revenido destes aços (Anexos 3 e 4) foi possível prever os intervalos de dureza que constam na Tabela 8. Por comparação conseguiu-se desde logo descartar o aço X10Cr13.

A curva dilatométrica foi obtida com um aquecimento até aos 1000°C seguido de um arrefecimento lento durante 5 horas (Figura 8).

A microestrutura do aço no estado de fornecimento (Figura 9) apresenta um elevado número de carbonetos finos dispersos homogeneamente pela matriz martensítica revenida.

2. CICLO TÉRMICO COM ARREFECIMENTO LENTO AO AR

Analisou-se a amostra após o ensaio dilatométrico. Pela análise dos diagramas TRC dos aços candidatos podem retirar-se as durezas apresentadas (Tabela 9). Comparando com o ensaio de dureza, percebe-se que a dureza se encontra no intervalo esperado para o aço X40CrSiMo10-2, 30 HV abaixo do previsto para o aço X45CrSi9-3 e muito distante para o aço X20Cr13, que será por isso desconsiderado.

A redução da dureza, pode estar relacionada com a temperatura do aquecimento, que por atingir apenas os 1000°C (abaixo da temperatura proposta no diagrama TRC) não permitiu obter o teor de carbono máximo dissolvido na matriz de austenite.

A microestrutura obtida (Figura 10) consiste numa matriz essencialmente ferrítica (fase clara) com carbonetos esferoidizados (fase escura) dispersos pela mesma. Os elementos carburígenos, como o Cr, arredondam as lamelas da cementite da perlite reduzindo a área de contacto entre as fases e a energia total do sistema, tornando a estrutura mais estável [21].

3. TÊMPERA MARTENSÍTICA

O tratamento térmico realizado encontra--se esquematizado na Figura 11, tendo sido concebido com base na temperatura de austenitização dos gráficos TRC (1100°C) e temperatura Ac3 obtida, usando uma atmosfera não controlada, um intervalo de tempo que respeitasse a espessura do material (11,5 mm) e garantisse a homogeneização da temperatura da peça. O tempo de arrefecimento equivale a cerca de 7-8 segundos (considerando a espessura da peça), sendo efetuado em água. A Tabela 10 permite comparar os valores de dureza previstos pelos gráficos TRC e a obtida pelo ensaio de dureza, concluindo-se que o candidato que melhor se aproxima é o aço X45CrSi9-3.

A microestrutura da Figura 12 mostra a existência de agulhas de martensite, sendo possível observar dois tipos de carbonetos, uns mais finos e escuros e outros mais claros e grosseiros. Por hipótese, os primeiros estão associados ao tra-



Figura 9: Microestrutura do material 3 (ataque com Super Picral)

Tabela 9: Dureza estimada dos candidatos e dureza obtida (HV40)

| Materiais | X45CrSi9-3 | X40CrSi- Mo10-2 | X10Cr13 | Material 3 |
|---------------|------------|--------------------|---------|------------|
| Dureza [HV40] | 274-275 | 249-250 | 505-524 | 245 |



Figura 10: Microestrutura do material 3 após arrefecimento lento no ensaio dilatométrico(ataque com Super Picral) [21]



Figura 11: Ciclo térmico para a têmpera martensítica

| Tabela 10: Durezas estimada | dos | candidatos | e dureza | obtida | (HV40 | D) |
|-----------------------------|-----|------------|----------|--------|-------|----|
|-----------------------------|-----|------------|----------|--------|-------|----|

| Materiais | X45CrSi9-3 | X40CrSiMo10-2 | Material 3 |
|---------------|------------|---------------|------------|
| Dureza [HV40] | 658-668 | 725-738 | 648 |



Figura 12: Microestrutura do material 3 após têmpera (ataque com picral)

tamento térmico e os segundos poderão revelar a existência de carbonetos complexos, característicos do estado inicial da amostra antes da têmpera. Estes carbonetos complexos podem resultar da segregação de Cr e possivelmente de Si e seriam sempre de esperar no diagrama TRC do aço X45CrSi9-3. Esta microestrutura aliada à dureza obtida, fazem deste aço o melhor candidato para esta secção [22, 23].

CONCLUSÕES

Este trabalho experimental de identificação de componentes teve como objetivo identificar quais os materiais que compõem uma válvula de escape de um motor de um navio Cummins NTA 855. Constatou-se que a válvula é composta por três materiais dissimilares.



Figura 13: Válvula analisada e proposta dos possíveis materiais utilizados no seu fabrico

Para o material 1, verificou-se que a Stellite 6 era a que melhor se enquadrava com a análise realizada.

Para o material 2 verificou-se que este não apresentava temperaturas de transição. Devido à microestrutura obtida e ao facto de ser amagnético, confirmou-se a previsão de que seria um aço inoxidável austenítico. A análise mais aprofundada dessa microestrutura permitiu colocar a hipótese deste material corresponder ao aço austenítico AISI 21-4N, apesar das semelhanças entre os possíveis candidatos.

O ensaio de dureza efetuado no aço do material 3 no estado de utilização permitiu desde logo remover um dos candidatos. A amostra que foi submetida ao ensaio dilatométrico foi também analisada como um arrefecimento lento e nesta fase foi também descartado outro dos candidatos pelas durezas muito distintas das esperadas. Para além disso, foi também realizada uma têmpera em água, onde o aço X45CrSi9-3 foi o que melhor se aproximou em termos de similaridade dos resultados obtidos. Pensa-se que para o arrefecimento lento, a temperatura de austenitização foi inferior à recomendada, o que justifica os resultados contraditórios dos dois arrefecimentos. Sendo a têmpera martensítica o tratamento mais recomendável, acredita-se que o aço martensítico X45CrSi9-3 seja o tipo de material que compõe a haste.

A Figura 13 esquematiza os resultados obtidos.

As estudantes autoras deste artigo consideram que este trabalho, apesar de ter sido um grande desafio em termos de complexidade e tempo despendido, foi fundamental para a assimilação dos conteúdos programáticos da unidade curricular.

AGRADECIMENTOS

As estudantes autoras deste artigo agradecem a colaboração do seu colega de grupo Daniel Serra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, J. L., & Figueiredo, M. V. (2016, October). Experimental classes of metallic materials challenges in identifying steel components. In 2016 2nd International Conference of the Portuguese Society for Engineering Education (CISPEE) (pp. 1-7). IEEE.
- [2] Lino Alves, J., & Duarte, T. (2023). Teaching ceramic materials in mechanical engineering: An active learning experience. International Journal of Mechanical Engineering Education, 51(1), 23-46.
- [3] Cerdoun, M., Carcasci, C., & Ghenaiet, A. (2016). An approach for the thermal analysis of internal combustion engines' exhaust valves. Applied Thermal Engineering, 102, 1095-1108.
- [4] https://parts.cummins.com/gateway/api/IACDataServices/graphics/rtgraphics/english/parts kn/1/kn100gs.png. Acedido a 8 de dezembro de 2024.
- [5] Zhao, R., Barber, G. C., Wang, Y. S., & Larson, J. E. (1997). Wear mechanism analysis of engine exhaust valve seats with a laboratory simulator. Tribology Transactions, 40(2), 209-218.
- [6] Forsberg, P., Hollman, P., & Jacobson, S. (2011). Wear mechanism study of exhaust valve system in modern heavy duty combustion engines. Wear, 271 (9-10), 2477-2484.
- [7] Tucho, W. M., Cuvillier, P., Sjolyst-Kverneland, A., & Hansen, V. (2017). Microstructure and hardness studies of Inconel 718 manufactured by selective laser melting before and after solution heat treatment. Materials Science and Engineering: A, 689, 220-232.
- [8] https://www.researchgate.net/profile/Piotr-Maj/publication/320226552/figure/fig3/AS:5462 23400681473@1507241215838/Microstructure-of-Inconel-718-in-the-initial-state.png. Acedido a 8 de dezembro de 2024.
- [9] https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2352492822002410-gr3_lrg.jpg. Acedido a 8 de dezembro de 2024.
- [10] Ferozhkhan, M. M., Kumar, K. G., & Ravibharath, R. (2017). Metallurgical study of Stellite 6 cladding on 309-16L stainless steel. Arabian Journal for Science and Engineering, 42(5), 2067-2074.
- [11] Khan, M. I., Khan, M. A., & Shakoor, A. (2018). A failure analysis of the exhaust valve from a heavy duty natural gas engine. Engineering Failure Analysis, 85, 77-88.
- [12] Tomaszewski, S., Grygier, D., & Dziubek, M. (2023). Assessment of engine valve materials. Combustion Engines, 62(3), 48-51.
- [13] "Heat Treatment Engine Valves". Garima Global. Acedido a 8 de dezembro de 2024. https://www. garimaglobal.com/assets/pdf/HEAT%20TREATMENT%20-%20ENGINE%20VALVES.pdf
- [14] https://www.starwire.in/wp-content/uploads/2023/09/Enginevalvesteel.pdf. Acedido a 8 de dezembro de 2024.
- [15] Murali, A. P., Ganesan, D., Salunkhe, S., Abouel Nasr, E., Davim, J. P., & Hussein, H. M. A. (2022). Characterization of Microstructure and High Temperature Compressive Strength of Austenitic Stainless Steel (21-4N) through Powder Metallurgy Route. Crystals, 12(7), 923.
- [16] Klueh, R. L., Maziasz, P. J., & Lee, A. E. (1988). Manganese as an austenite stabilizer in Fe Cr Mn C steels. Materials Science and Engineering: A, 102(1), 115-124.
- [17] Seralathan, S., Raju, T. N., Venkat, I. G., Hariram, V., & Dinesh, S. (2020). Thermal analysis on different exhaust valve materials of compression ignition engine. Materials Today: Proceedings, 33, 4105-4111.

- [18] https://blogger.googleusercontent.com/img/b/R29vZ2xl/AVvXsEgysxXCFtKSy_moFjp8oae0j-ZL5XNTYxphYxS0vRXVvhhgdla7LW8ghl96BNBANqX6IWqplLcdvTPINPFP1iD1vKW94gR9ztScerXbn2lfG_qd64Os9NtnQVU4gZk1cLCJU8k-_WM45cUo/s1600/funcion3.jpg. Acedido a 8 de dezembro de 2024.
- [19] Krauss, G. (2015). Steels: processing, structure, and performance. ASM international.
- [20] https://www.sij.si/en. Acedido a 8 de dezembro de 2024.
- [21] Alza, V. A. (2021). Spheroidizing in steels: Processes, mechanisms, kinetic and microstructure-A review. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 18(3), 63-81.
- [22] Lucas F. M. da Silva, António Torres Marques, Jorge Lino Alves (2023). "Materiais de Construção". 2ª Edição. Engebook.
- [23] Lucas Filipe Martins da Silva, Fernando Jorge Lino Alves, António Torres Marques, Teresa Margarida Guerra Pereira Duarte, Viriato Teixeira de Abreu e Antunes, Paulo Jorge Roque O. Nóvoa (2013), "Problemas e Trabalhos Práticos de Materiais de Construção", Engebook.

ANEXOS



ANEXO 1: a) Diagrama TRC do aço X45CrSi9-3 (https://steelselector.sij.si/data/cct/790.gif); b) X40CrSiMo10-2 (https://steelselector.sij.si/data/cct/PK941.jpg)

GESTÃO & TECNOLOGIAS

ANEXOS



ANEXO 2: a) Diagrama TRC do aço X10Cr13 (https://steelselector.sij.si/data/cct/777.gif); b) X20Cr13 (https://steelselector.sij.si/data/cct/3787.gif)



ANEXO 3: Curvas de revenido dos aços X45CrSi9-3 (SUH1) e X40CrSiMo10-2 (SUH3) (adaptado de Tohoku Steel, "Heat-resistant steel for intake valves". https://www.tohokusteel.com/common/img/product/specialsteel/heat-resistant/pic_tainetsu_02.gif)



ANEXO 4: Curvas de revenido dos aços X10Cr13 (AISI 410) e X20Cr13 (AISI 420) (adaptado de ResearchGate.

https://www.researchgate.net/figure/Shows-the-change-in-the-hardness-HRc-with-the-tempering-temperature_fig1_385942918)

