

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

**AVALIAÇÃO DE AÇOS AO MANGANÊS PARA A
INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA**

JÚLIA LEONCIO MONTI

SÃO CARLOS – SP

2022

JÚLIA LEONCIO MONTI

**AVALIAÇÃO DE AÇOS AO MANGANÊS PARA A
INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA**

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: José Eduardo Spinelli

SÃO CARLOS – SP

2022



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

NOME: Julia Leoncio Monti

RA: 625744

TÍTULO: Avaliação de aços ao manganês na indústria automobilística

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. José Eduardo Spinelli

CO-ORIENTADOR(A): Me. Guilherme Lisboa de Gouveia

DATA/HORÁRIO: 22/04/2022, 16h

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. José Eduardo Spinelli	9,0	9,0
Prof. Dr. Tomaz Toshimi Ishikawa	9,0	9,0
Média	9,0	9,0

Certifico que a defesa de monografia de TCC realizou-se com a participação a distância dos membros Prof. Dr. José Eduardo Spinelli e Prof. Dr. Tomaz Toshimi Ishikawa e depois das arguições e deliberações realizadas, os participantes à distância estão de acordo com as informações redigidas nesta ata de defesa.

Prof. Dr. José Eduardo Spinelli

DEDICATÓRIA

Esse trabalho é dedicado às noites mal dormidas, às pedras no caminho e, principalmente, à Júlia do passado por não ter desistido de si.

AGRADECIMENTO

Gostaria de direcionar minha irrestrita gratidão à Universidade Federal de São Carlos, por ser meu lar desde 2015. Ter sido sua aluna é uma honra que apenas quem passou por suas cadeiras é capaz de explicar.

À minha família, pai, mãe, Luísa e Helena pelo orgulho e apoio que sempre demonstraram ter. Vocês são incorruptível registro vivo de quem sou, frequentemente revisitado.

São também ao mesmo tempo a ponte sob águas turbulentas e o bote de segurança para que me sinta confortável em me jogar em direção ao mundo. E por isso serei eternamente grata.

Um agradecimento especial ao meu orientador, que domina a arte de lecionar de maneira humana e afável, por quem nutro verdadeira admiração.

Obrigada aos envolvidos por me permitirem almejar ir sempre mais longe e tornarem minha graduação como engenheira possível.

Reconheço em mim
A pessoa que me tornei
Nesses corredores
Nas tarefas extenuantes
Grandes compromissos
Nas risadas dos amigos

Nas manhãs de aulas vazias
De Herácles
Após noites longas e cheias
De Dionísio

E de longe agora eu sei
Que não me cabe apenas o cálculo
Mas sim a leveza
De quem um dia estudou a matéria
E sabe que ele se organiza
Também que jamais endurece
No coração de quem já não caminha só

Fonte: autoria própria (2022)

RESUMO

O petróleo é uma fonte de combustíveis que possibilitou uma das maiores transformações culturais e econômicas desde o período da primeira revolução industrial. Entretanto, é também um dos maiores problemas ambientais, além de ser frequentemente impactado por questões políticas. Sua relevância aumenta no período entre guerras do século XX, com o crescimento e aumento da produtividade de automóveis. Nesse contexto, a Engenharia de Materiais possui o desafio de ser o que se propõe: um meio para um fim nas demais escolas de Engenharia. A aplicação de aços avançados de elevada resistência e baixa densidade se torna, portanto, uma necessidade. Porém, a área carece de estudos aprofundados para que possa ser utilizado em larga escala. Com a finalidade de servir de embasamento para tal, o presente trabalho se debruçou na bibliografia já existente, tendo lido dezenas de artigos e capítulos de livros. Além disso, com base em um deles foram selecionadas três ligas de composição Fe-25Mn-(3-8)-Al-C para avaliação das fases presentes e densidade, em relação à temperatura com apoio do software termodinâmico ThermoCalc®.

Palavras-chave: Aços leves. Fe-Mn-Al. Aços alto Mn. Aços TWIP.

ABSTRACT

Oil is a source of fuel that has enabled one of the greatest cultural and economic transformations since the period of the first industrial revolution. However, it is also one of the biggest environmental problems, in addition to being frequently impacted by political issues. Its relevance increases in the interwar period during the 20th century, with the growth and increase in automobile productivity. In this context, Materials Engineering has the challenge of being what it proposes: a means to an end in other Engineering schools. The application of advanced high strength and low-density steels therefore becomes a necessity. However, the area lacks in-depth studies so that it can be used on a large scale. To serve as a basis, the present work focused on the existing literature, counting on reading approximately 25 articles and book chapters. In addition, based on one of them, three Fe-25Mn-(3-8)-Al-C alloys were selected for evaluation of the formed phases and density, both as a function of temperature using the thermodynamic software ThermoCalc®.

Keyword: Lightweight steels. Fe-Mn-Al. High-Mn steels. TWIP steels.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Área de pesquisa da publicação, em unidades	3
Figura 2 - País da publicação, em unidades	3
Figura 3 - Porcentagem de peso em veículos automotores, por categoria de aço	7
Figura 4 - Célula unitária do carboneto k	10
Figura 5 - Variação da densidade mássica e redução da densidade em função do teor de alumínio em aços, em %p	12
Figura 6 - Contorno de macla	15
Figura 7 - Propriedades mecânicas por classe de aços	15
Figura 8 - Propriedades mecânicas de ligas Fe-Mn-Al-C	17
Figura 9 - Correlação entre a densidade e os teores de alumínio e Manganês	18
Figura 10 - Absorção de energia por classes de aço, em J/mm ³	19
Figura 11 - Densidade (em g/cm ³) e energia de falha de empilhamento em função da variação do teor de alumínio	21
Figura 12 - 'Print screen' da tela inicial do endereço eletrônico do software Thermocalc®	22
Figura 13 – correlação entre temperatura, densidade e fases	24
Figura 14 (a,b e c) – correlação entre temperatura, densidade e fração sólida	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ligas de alto manganês e suas aplicações, em inglês	9
Tabela 2 - Fases presentes em relação à composição em aços da classe Fe-Mn-Al-C	12

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	APRESENTAÇÃO	1
1.2	AVALIAÇÃO BIBLIOMÉTRICA	2
2	OBJETIVOS	5
3	REVISÃO DA LITERATURA	6
3.1	IMPORTÂNCIA DOS AÇOS AO MN DE BAIXA DENSIDADE	6
3.2	MICROESTRUTURA	9
3.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS	15
4	MATERIAIS E MÉTODOS	20
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
6	CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS	26
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

É de conhecimento comum a problemática que se vive hoje em relação ao aquecimento global e as mudanças climáticas. Dentre as ações antrópicas causadoras, temos as emissões de CO_2 como a mais relevante delas (IPCC, 2014), sendo os veículos responsáveis por 59% da sua produção, segundo a *United States Environmental Protection Agency (Carbon Monoxide (CO) Pollution in Outdoor Air, 2021)*.

Nesse contexto, torna-se interessante elaborar estratégias para reduzir a liberação de gases tóxicos, sendo possível interpretar a melhoria na eficiência dos combustíveis fósseis como uma das factíveis vias para obtenção desse resultado.

Unindo esse propósito à atuação de um Engenheiro de Materiais na indústria automobilística, torna-se imprescindível a pesquisa por materiais que tornem a redução da emissão de CO_2 possível.

As ligas abordadas no presente trabalho têm sua importância quando, nesse cenário, se torna possível aliar propriedades mecânicas surpreendentes com densidade inferior e, por consequência, do peso e do gasto energético dos veículos. Isto é, ligas de aço que substituem Ni-Cr por Mn-Al possuem uma maior relação de rigidez por peso, e por isso levam à uma maior eficiência dos combustíveis fósseis com melhor performance de propriedades mecânicas.

Entretanto, alguns estudos apontam que, para que haja redução na emissão dos gases responsáveis pelo efeito estufa seja efetiva, é necessário que ela ocorra em proporção superior ao aumento projetado. Nesse caso, isso quer dizer que a obtenção dos metais presentes na liga não deve possuir efeitos negativos de maior proporção do que sua aplicação é capaz de equiparar (KAWAJIRI; KOBAYASHI; SAKAMOTO, 2020).

Assim, se torna necessário citar que a produção de manganês, quando realizada por meio da eletrólise, possui emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa desprezíveis (CHERUBINI; RAUGEI; ULGIATI, 2008). Por outro lado, o alumínio possui uma extração extremamente poluente, mas é considerado eternamente reciclável, especialmente no Brasil (CHAVES; MARQUES; SILVA,

2018).

É importante ressaltar que, aços são utilizados na confecção de automóveis desde seus primeiros exemplares, devido seu preço acessível e propriedades atraentes para a aplicação (FEKETE, 2017).

Tomando como parâmetro as mais comuns nessa indústria, como HSLA, as ligas aqui debatidas de Fe-Mn-Al-C, possuem reduções de densidade de até 17%. Porém, sua dureza, ductibilidade são superiores (ZAMBRANO, 2018).

A tenacidade ao impacto é, por sua vez, comparável à de aços de alta resistência mecânica. Aliada com a capacidade de absorver energia superior à de ligas destinadas à estampagem profunda, é possível pensar nas ligas de alto Mn como mais seguras aos passageiros em caso de acidentes automobilísticos.

Apesar das propriedades de elevado destaque supracitadas, tais ligas ainda não são difundidas na indústria por carecerem de maiores estudos que embasem seu processamento e aplicação (CHEN, 2017).

1.2 Avaliação Bibliométrica

A avaliação bibliométrica contida no presente capítulo foi realizada a partir dos dados obtidos no portal de periódicos da CAPES, na base '*Web of Science – Coleção Principal*', com acesso remoto do Portal Café, cedido pela Universidade Federal de São Carlos.

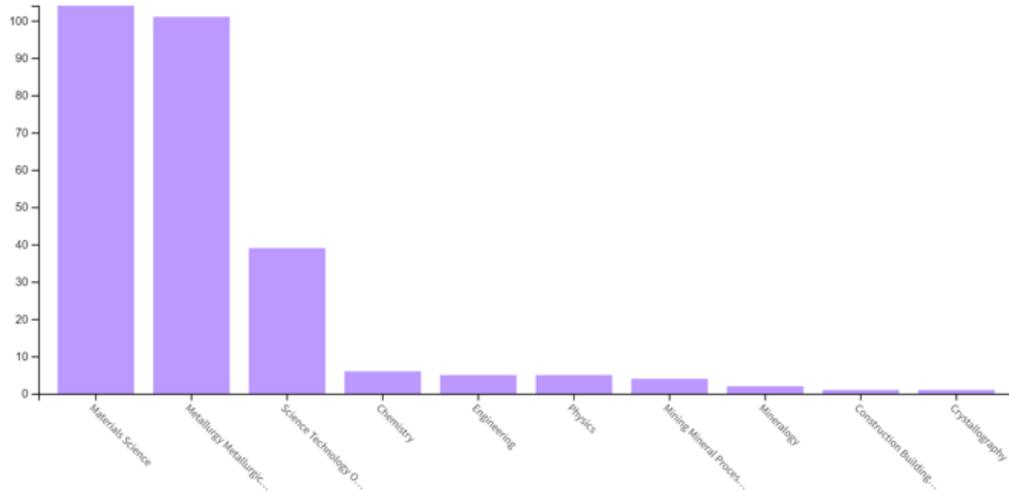
Buscando nessa base a união de duas palavras-chave '*lightweight steels*' e '*high Mn steels*', é possível selecionar o campo 'analisar resultados'. Assim, obtemos 126 resultados, todos são coerentes e possuem intersecções com a área desse trabalho.

Adicionalmente, é possível observar que metade dos trabalhos encontrados foram produzidos na China, sendo os demais diluídos em diversas nacionalidades. Apesar de nenhum trabalho encontrado na busca ser brasileiro, sabe-se que há um grupo de estudos na área dentro do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, cujo um dos artigos publicados é aqui citado.

Os campos de estudo interessados nos temas, são diversos. Como esperado, a maior parte é representado por Ciência dos Materiais e Metalurgia. Porém, as áreas

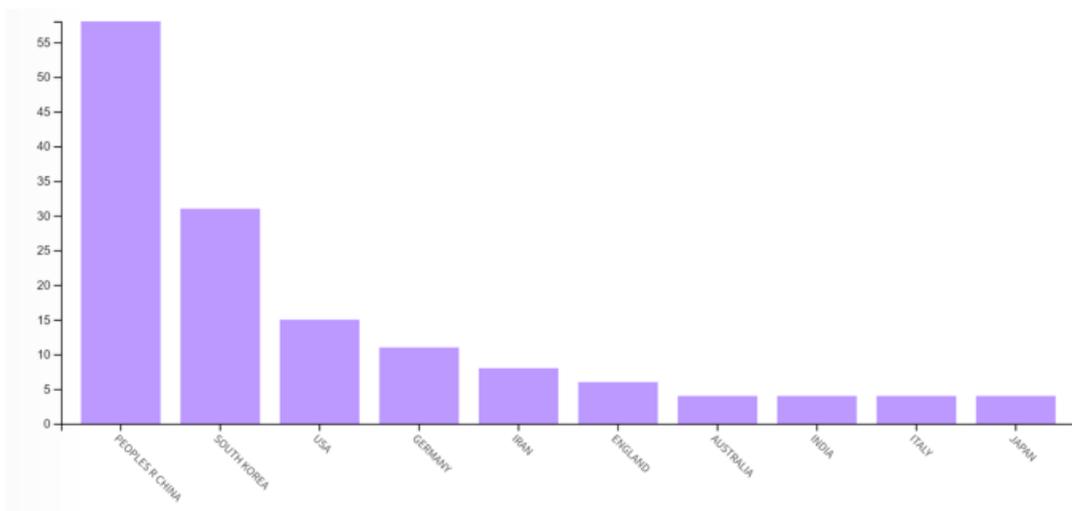
de estudo que abordam os aços leves e de alto Mn são também diversas.

Figura 1 – Área de pesquisa da publicação, em unidades



Fonte: Web of Science (2022) Figura

2 – País da publicação, em unidades



Fonte: Web of Science (2022)

Adicionado à pesquisa as palavras-chave 'TWIP', obtemos apenas 13

resultados.

Pesquisando as palavras Fe-Mn-Al, juntamente com *'high Mn steels'* e *'light weight steels'* nos últimos cinco anos, são encontrados 49 resultados.

Porém, a pesquisa sendo realizada entre os anos de 1980 e 2000, não encontrou nenhum resultado.

É possível entender o quanto a adição do alumínio como elemento de liga desses aços, já amplamente pesquisados, tem sido preponderante nos últimos anos.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é servir de ponto de partida para trabalhos que busquem a aplicação de ligas Fe-Mn-Al-C, especialmente na indústria automobilística. Como objetivos específicos, podemos citar:

- A avaliação das ligas Fe-25Mn-(3-8)Al-0,4C através de software termodinâmico, estudando as mudanças de fase e propriedades, como a densidade.
- Análise crítica do arcabouço teórico existente sobre o tema.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Importância das ligas Fe-Mn-Al na indústria automobilística

Os primeiros automóveis de motor à combustão, originados na Alemanha, eram compostos por uma armação de madeira, não sendo muito diferentes de uma carruagem da época.

O uso de materiais metálicos na confecção do advento, por sua vez, só foi adotado no início do século XX, com a tecnologia para a produção de chapas metálicas. Nesse momento, o aço competia com a madeira e o alumínio na construção do corpo dos automóveis (FEKETE; NAHIL, 2017). Porém, sua popularização ocorreu com o lançamento do modelo T da Ford, nos anos 20, se tornando o material mais utilizado. O aço permitiu a produção de automóveis em larga escala e todas as mudanças sociais por ele geradas.

Para o problema, a saída encontrada foi a adoção de HSLA (*'High-Strength Low-Alloy'*) endurecíveis por precipitação. Porém, sua baixa ductibilidade dificultou o processo de adoção de aços leves. Isso se deve ao fato dos aços com percentual de carbono abaixo de 0,13%, como o SAE 1005, possuírem um preço acessível, aliado à uma boa conformabilidade e soldabilidade.

Observando o contexto histórico do fim da Segunda Guerra Mundial e o rápido crescimento da indústria nos EUA, nota-se uma relação íntima entre o desenvolvimento da manufatura de automóveis e a siderurgia.

Nesse contexto, os materiais de maior dureza, menor densidade e maior segurança para os passageiros só passaram a ser explorados a partir da década de 60. Esse processo se intensificou em meados de 1970, quando a primeira crise do petróleo forçou a indústria a buscar uma redução do peso dos automóveis como saída para um menor consumo de combustível.

Para assegurar tais objetivos, foram criadas nos EUA as agências reguladoras *Environmental Protection Agency (EPA)*, *National Highway and Traffic Safety Administration (NHTSA)* pela redução da poluição e maior segurança dos usuários, respectivamente. Porém, observou-se o movimento oposto: o crescimento exponencial das mortes no trânsito e a emissão de gases geradores do efeito estufa.

Tal questão também se tornou tema de pesquisa, dentro do campo da

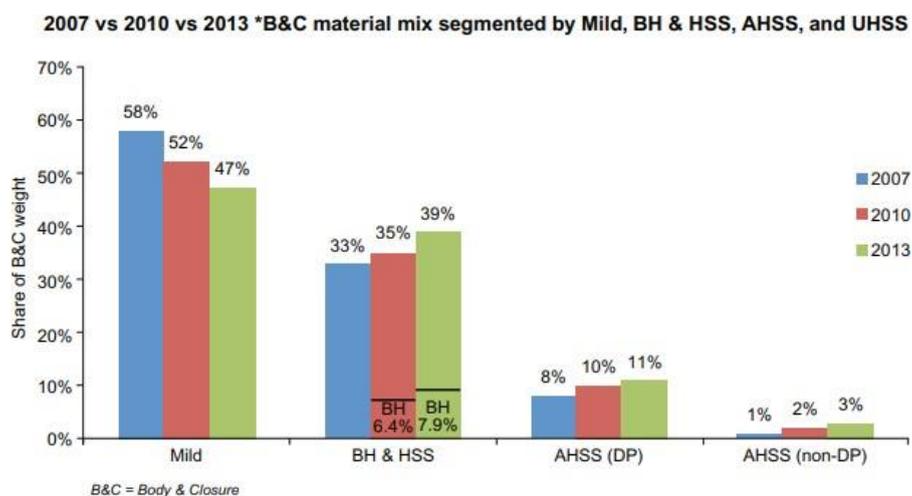
Engenharia de Materiais, em decorrência do desafio existente em aliar tais solicitações - de eficiência e segurança - com a processabilidade, preço e elevada produtividade necessária. Isso levou à invenção da primeira e da segunda geração de aços avançados de alta resistência, ocorrida de meados dos anos 90 até os dias atuais. Porém, é possível afirmar que o desenvolvimento de AHSS¹ se encontra na sua terceira geração atualmente. (JACOB et al., 2020)

Segundo Fekete (2017, apud ABRAHAM, 2013 p. 15), como consequência, em 2013 um veículo automotor pesava em média cerca de 1.700kg, sendo 57% disso formado por componentes de aço e ferro.

No gráfico da Figura 3, é possível observar a tendência da substituição dos aços macios por aços de alta resistência, de microestrutura ‘*dual-phase*’¹ (DP) ou não.

Outra classe em crescimento no período analisado do trabalho citado, é o dos aços passíveis de endurecimento por recozimento, chegando à 39% do peso total. Isso ocorre uma vez que, para peças estruturais que exigem alto nível de dureza, como transmissões e engrenagens, essa possibilidade de beneficiamento é extremamente competitiva.

Figura 3 – porcentagem de peso em veículos automotores por categoria de aço.



Fonte: Fekete, 2017

¹ AHSS são aços avançados de alta resistência, da sigla em inglês para ‘*advanced high strenght steels*’

Porém, é importante ressaltar que, a redução do peso implica também na perda de potência, uma vez que os componentes responsáveis também serão reduzidos para serem mais bem acomodados no veículo. É necessário, portanto, um balanço entre a requisição do mercado e dos consumidores.

Tratando mais especificamente das ligas alto manganês - foco do presente trabalho - a origem pode ser estabelecida, segundo Zambrano (2017), por volta de 1880, quando o britânico Robert Hadfield publicou trabalhos sobre Fe-Mn-C e, posteriormente, adicionou o alumínio como elemento, gerando a classe Fe-Mn-Al-C. Sua relevância cresceu, entretanto, durante os anos de 1980, quando a substituição da liga Fe-Cr-Ni passou a ser bem avaliada, devido ao menor impacto ambiental e preço inferior.

Porém, os resultados não foram satisfatórios para tal aplicação e, o maior crescimento no estudo dos aços de alto manganês foi obtido por Frommeyer, um professor do Instituto Max Plank de Estudo do Aço, em Düsseldorf na Alemanha.

Suas descobertas possibilitaram a aplicação dos materiais nas carrocerias automotivas e são, portanto, uma efeméride no setor. (FROMMEYER; BRÜX, 2006)

Ou seja, as ligas Fe-Mn-Al-C que, inicialmente eram estudadas quase que exclusivamente do ponto de vista da metalurgia física e que, posteriormente haviam sido descartadas na principal aplicação para as quais haviam sido designadas (aços inoxidáveis), passaram a obter excelentes resultados para o setor automotivo.

O sucesso se deve à diversos fatores:

A principal razão por trás desse sucesso é que esses mecanismos de deformação estendem a deformação plástica além dos valores usuais de ductilidade, sem nenhum tratamento especial ou elementos de liga caros, o que permitiu obter geometrias mais complexas, ou seja, foi possível um maior grau de deformação plástica durante o processamento, até então desconhecido. Além disso, com o mesmo raciocínio, pode-se inferir que uma grande quantidade de energia pode ser absorvida por este tipo de aço durante um acidente de carro, adicionando uma segurança extra aos passageiros. (ZAMBRANO, 2017, p. 5, tradução nossa)

Sendo assim, compreende-se que a grande pretensão de utilização das ligas no mercado veicular, é também decorrente de sua alta possibilidade de

processamento, tema de que será discutido mais profundamente na seção 3.3 do presente trabalho.

Tabela 1 – Ligas de alto manganês e suas aplicações, em inglês.

The development and applications of Fe-Mn-Al-C steels.

Alloys ^a	Targeted properties	Developers	Aimed applications	Year
Fe-13Mn-1.2C	High toughness and excellent wear resistance	Hadfield [15]	The mining industry, cement mixers, railway switches	1882
Fe-(20–50)Mn-(3–12)Al	Good ductility and corrosion resistance	Dean and Anderson [16]	Electrical heating elements	1943
Fe-34Mn-10Al-0.76C	Good corrosion and oxidation resistance	Ham and Cairns [17]	Replacement of Cr-Ni stainless steels	1958
Fe-(25–30)Mn-(8–10)Al-1C	Precipitation hardening and good oxidation resistance	Kayak [18]	Springs, gears, landing gears	1969
Fe-30Mn-5Al-0.3C-Nb	High strength and elongation at lower temperatures	Kim et al. [10]	Cryogenic structures	1985
Fe-(18–28)Mn-(9–12)Al-(0.7–1.2)C	Low weight, high crash worthiness	Frommeyer and Brück [6]	Automotive body frames	2000

^a All the alloy chemistries in this paper are given in wt% unless otherwise mentioned.

Fonte: Chen et. al, 2017

A Tabela 1 acima mostra tal histórico com maior detalhamento. Os estudos de Hadfield foram pensados na aplicação nos setores de mineração e construção civil, devido à resistência ao desgaste e dureza do material.

Ainda segundo Chen (2017), além desse e a substituição de aços inoxidáveis, sua resistência à corrosão, oxidação e ductibilidade já foram pensados também para elementos elétricos, molas e engrenagens.

Kim (2013) também já propôs a utilização para estruturas criogênicas, devido ao aumento do alongamento e elevada resistência que as ligas Fe-Mn-Al-C possuem à baixas temperaturas.

Apenas em 2000 Frommeyer e Brück propuseram a sua utilização em carrocerias automotivas, aplicação pela qual o material possui maior notoriedade atualmente. (CHEN et. al, 2017)

3.2 Microestrutura

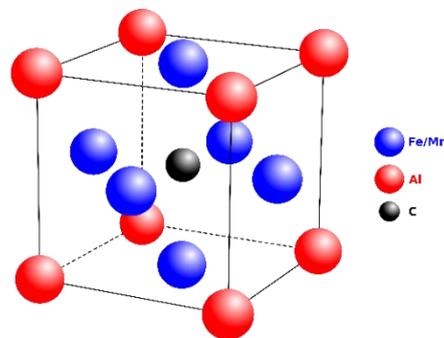
As fases no equilíbrio α/γ e β rica em manganês foram descobertas em 1933 e 1959, respectivamente, no sistema ternário Fe-Mn-Al, dotados de elevado teor de

Mn. (ZAMBRANO, 2017). Porém, Chakrabarti (1977) conseguiu estruturar tais correlações também para Mn-Al mais detalhadamente.

Em meados dos anos 90 foi caracterizado um intermetálico $((Fe,Mn)_3AlC)$, e a fase κ , dotada de uma estrutura ordenada cúbica de face centrada. Ela se tornou de suma importância para o entendimento da microestrutura e suas propriedades. Será abordada mais profundamente mais à frente no trabalho.

É possível observar na Figura 4 que o carbono é representado pela menor esfera, no centro da célula, em um sítio octaédrico. O alumínio, por sua vez, ocupa os vértices, enquanto o ferro e o manganésio ocupam os centros das faces.

Figura 4 – célula unitária do carboneto κ



Também nesse período, foi desenvolvido o primeiro diagrama de fases do sistema Fe-Mn-Al-C. Ele foi obtido experimentalmente por Goretskii et. Al (1990), através de amostras de Fe-(20-35)Mn-10Al-C, variando também o carbono, entre 0,4% e 1,4%. Trabalhos posteriores também observaram variações de alumínio entre 5% e 18%, dentro dos sistemas Fe-30Mn-XAl-XC e Fe-20Mn-XAl-XC.

Tais amostras foram mantidas em temperaturas entre 627°C e 1127°C por até 250 horas. Concomitantemente, amostras foram mantidas por intervalos de tempo entre 14 e 210 horas, em temperaturas entre 900°C e 1200°C.

Como resultado, obteve-se que a fase β -Mn é estável para composições de manganês superiores a 25%, porém, em temperaturas inferiores a 900°C.

(ZAMBRANO, 2017)

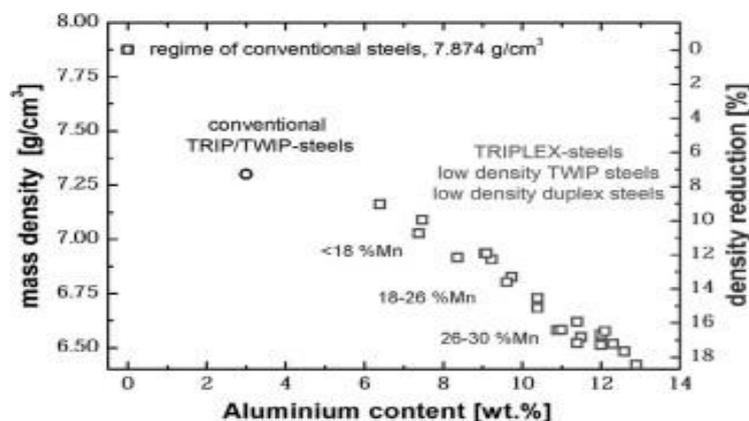
Porém, ainda segundo Zambrano (2017), o entendimento do sistema quaternário Fe-Mn-Al-C, bem como seus diagramas de fases não são completamente elaborados e necessitam de maiores estudos para sua maior compreensão.

Utilizando um método de software de simulação que se assemelha ao que será discutido no capítulo de Materiais e Métodos do presente trabalho, Chin et al. (2010) aplicaram o método CALPHAD para obter um diagrama de fases do sistema Fe-20Mn-Al-C, nos fornecendo uma melhor compreensão do equilíbrio da fase γ/α e do carboneto κ .

É possível, dentro dessa classe de aços, realizar um controle seletivo da microestrutura presente. Isso se deve, em grande parte devido à presença de fases ordenadas e desordenadas de células cúbicas de face centrada e de corpo centrado. Entretanto, as propriedades mecânicas como dureza e ductibilidade são advindas da sua capacidade de passar pelo processo de plasticidade induzida por transformação (TRIP) e plasticidade induzida por maclação² (GUTIERREZ-URRUTIA, 2020). Existem, porém, outros processos menos relevantes para a abordagem adotada no presente trabalho.

Ainda segundo Gutierrez-Urrutia (2020), é interessante observar que, para cada 1% em peso de Al adicionado como elemento de liga, a redução da densidade é de cerca de 1,3%, como é possível observar no gráfico da Figura 5 abaixo.

Figura 5 – Variação da densidade mássica e redução da densidade em função do teor de alumínio em aços, em %p



² Das siglas em inglês, 'transformation induced plasticity' (TRIP), 'twinning induced plasticity' (TWIP).

Fonte: Gutierrez-Urrutia (2020)

Enquanto um aço convencional possui a densidade de 7,874g/cm³, os TRIP/TWIP estão em torno de 7,25g/cm³. Já os aços de baixa densidade TWIP, triplex e duplex se encontram mais próximos de uma densidade de 7,10g/cm³. Esse valor, para a ordem de grandeza em toneladas como a massa de um veículo, por exemplo, pode levar a reduções muito relevantes no peso total.

É possível ainda, classificar o sistema aqui discutido pela matriz predominante em sua microestrutura seja ferrítica, austenítica ou dotados de uma microestrutura duplex.

As fases que podem ser encontradas no equilíbrio são: γ (austenita), α (ferrita), carboneto κ , M_3C carboneto (θ) e Mn β . Sua presença depende da faixa de composição de cada um dos elementos de Fe-Mn-Al-C e temperatura. (KIM; SUH; KIM, 2013)

A presença de tais fases em relação à faixa de composição da classe Fe-Mn-Al-C pode ser observada na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 – Fases presentes em relação à composição em aços da classe Fe-Al-Mn-C.

Fe-Al-Mn-C class	Ferritic	Austenitic	Ferrite-based duplex	Austenite-based duplex
Relevant phases	δ , B2, DO ₃ , κ	γ , α , δ , κ , β -Mn	α , δ , B2, DO ₃ , γ , α' , κ	α , B2, DO ₃ , γ , κ , β -Mn
Typical composition range	Mn < 5%	Mn: 15–30%	Mn: 3–10%	Mn: 10–25%
	Al: 5–9%	Al: 2–12%	Al: 3–9%	Al: 5–12%
	C < 0.1%	C: 0.5–2.0%	C < 0.4%	C: 0.6–1.0%

Fonte: Gutierrez-Urrutia (2017)

Nela, é possível observar que, dentro da faixa de composição estudada no presente trabalho (Fe-25Mn-(3-8)Al-0,4C), a microestrutura se aproxima de uma matriz austenítica ou duplex, baseada em austenita.

Ainda segundo o trabalho de Gutierrez-Urrutia (2017), uma explicação possível é o fato de que, uma maior composição de alumínio favorece a formação da fase ferrítica. A fase α é favorecida pelo Al somente para teores inferiores à 6% em massa.

Ainda assim, a presença do carboneto κ na fase γ é favorecida pela elevação da presença de alumínio e carbono, ainda que em temperaturas inferiores (próximas a 650°C) (KIM; SUH; KIM, 2013).

É possível também observar que, a estabilidade de austenita pode ser aumentada pela adição de 1% em massa de carbono. Essa alteração na composição pode gerar uma reação eutetóide na austenita, a decompondo em ferrita lamelar e carboneto κ . Porém, o teor na faixa de C aqui estudado é de apenas 0,4% (KIM; SUH; KIM, 2013).

Entretanto, a presença de austenita é beneficiada pelo manganês e carbono, lembrando que se trata de um aço de elevado teor de Mn (GUTIERREZ-URRUTIA, 2017).

Como já citado, a temperatura também é um fator de suma importância na determinação da microestrutura presente. *E.g.*, dentro das faixas de 0-2,3% de C e 0-9% de Al, em 900°C observa-se uma matriz puramente austenítica.

A cementita estável, por sua vez, é encontrada apenas para composições de baixo alumínio (sempre inferiores à 5,6%) e elevado carbono. (KIM; SUH; KIM, 2013)

Analisando agora com maior detalhamento a estrutura ferrítica formada nas ligas Fe-Mn-Al-C, é possível afirmar que o teor de Al fica na faixa entre 5 e 9%, enquanto o de Mn é inferior à 5% e o de C à 0,1%, sempre considerando o % em massa.

Caso seja necessário, a adição de outros elementos de liga comuns na indústria do aço - tais como vanádio, nióbio, titânio e silício -, há a precipitação também de carbonetos MC, promovendo maior refinamento de grão. (GUTIERREZ-URRUTIA, 2017)

Para algumas composições é também possível tratamentos termomecânicos, gerando a transformação da fase martensítica $\gamma \rightarrow \alpha'$. Neste cenário, são formadas na matriz ferrítica bandas de austenita.

É importante observar que a presença de Al modifica a estrutura cristalina da matriz, sendo possível para elevadas concentrações que a fase δ passe por uma transformação, gerando a fase B2 e DO₃, estequiometricamente FeAl e Fe₃Al, respectivamente. (KIM; SUH; KIM, 2013)

Quando se observa a matriz de estrutura austenítica, por sua vez:

Os aços austeníticos Fe–Mn–Al–C são caracterizados por alto teor de Mn (15–30%, em peso), teor de Al de (2–12%, em peso) e alto teor de C (0,5–2,0% em peso). Este tipo de aço de baixa densidade exibe microestrutura totalmente equiaxial-austenítica em condições de trabalho a quente. Comportamento de precipitação de carboneto e as características da transformação $\gamma \rightarrow \alpha$ são determinadas pela taxa de resfriamento e teores de Al e C. Em particular, alto teor de Al (> 9% em peso) promove a formação de ferrita desordenada com domínios B2 e DO₃ ordenados ao longo dos contornos de grão. (GUTIERREZ-URRUTIA, 2017, p.15, tradução nossa)

Ou seja, dentro das faixas de composição de aços leves de alto manganês abordados nesse trabalho, a presença predominante é de matriz austenítica.

Ainda segundo o autor - Gutierrez-Urrutia (2017) -, os aços duplex do sistema Fe-Mn-Al-C são formados por microestruturas de ferrita δ e α , austenita e carboneto κ e podem ser separados em duplex baseados em austenita e ferrita. O primeiro tipo, é caracterizado pelos teores variando de 3 a 10%, 5 a 9% e inferiores a 0,4%, em peso, para Mn, Al e C, respectivamente.

O segundo – duplex ferrítico -, por sua vez, possui faixas de composição de 10 e 25% para o manganês, 5 e 12% para o alumínio e 0,6 e 1,2% para o carbono, em peso (GUTIERREZ-URRUTIA, 2017).

É possível em ambas as classes de aços duplex observar segregação macroscópica de Mn e Al. Porém, suas características dependem das condições termodinâmicas para sua formação, crescimento e distribuição.

Considerando que os aços no presente trabalho abordados possuem deformação TWIP, é importante entender quais são as características microscópicas que levam a sua ocorrência. Na figura 6, pode ser observado um contorno característico de macla, defeito de baixa energia interfacial. A aparência de microestrutura espelhada apresentada nessa forma de deformação decorre do modo de reorganização das bandas cristalinas presente nos grãos do material.

Na maior parte dos metais a tensão necessária para que ocorra tal defeito é superior à do escorregamento (ou EFE). Por esse motivo, quanto menor a Energia de Falha de Empilhamento, mais a maclação é favorecida. (CARDOSO MONTAGNINI, 2018)

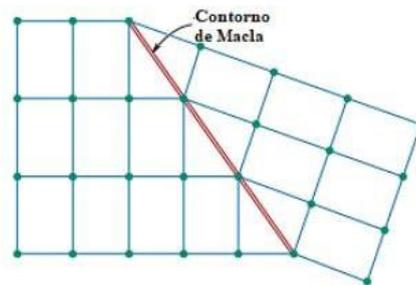
Caso outros sistemas favoráveis ao deslocamento na rede sejam restringidos, pode ocorrer a deformação TWIP. A formação dessas barreiras intragranulares, é

conhecida como “Efeito Hall-Petch Dinâmico” e é promotor de encruamento.

Tal mecanismo aumenta a resistência do material, uma vez que restringe ainda mais o deslocamento de discordâncias. Porém, a ductibilidade também é

favorecida (CARDOSO MONTAGNINI, 2018).

Figura 6 – Contorno de macla em materiais.



Fonte: Callister (2012)

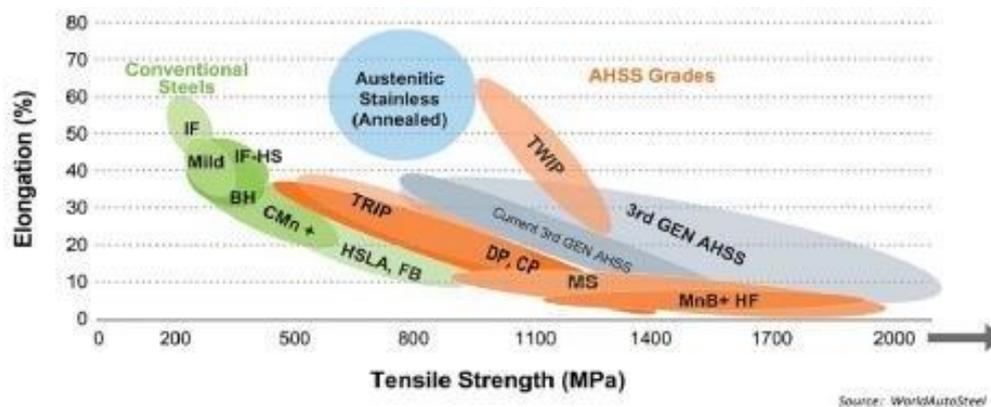
3.3 Propriedades Mecânicas

Os aços leves, dotados de elevado teor de manganês são frequentemente relacionados aos aços TWIP (devido sua capacidade de sofrer tal modo de deformação) e aos aços avançados de alta resistência (AHSS).

O gráfico da Figura 7 abaixo mostra a correlação entre alongamento e resistência à tração para diferentes classes de aço. É possível perceber que uma alta capacidade de alongamento antes da fratura não é comumente associada à elevada resistência.

Porém, os aços TWIP possuem um bom equilíbrio entre as duas propriedades, enquanto os AHSS possuem uma faixa mais ampla de propriedades.

Figura 7 – propriedades mecânicas por classe de aço.



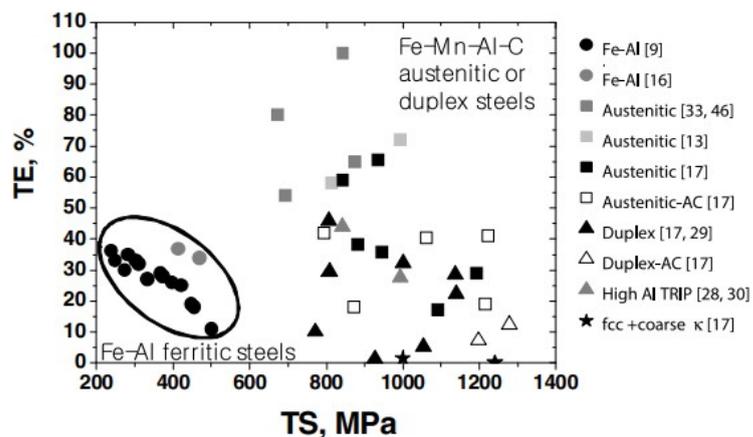
Fonte: Jacob et al., 2020

Por outro lado, o gráfico pertencente à Figura 8 abaixo apresenta resultados do alongamento sobre tensão em função da resistência mecânica para ligas Fe-Mn-Al-C.

As ligas nele apresentadas designadas por 'austenitic' e 'duplex', que possuem maior coerência com o foco desse estudo, associam-se a uma ampla variedade de propriedades no gráfico. Porém, é possível observar que os símbolos que os representam estão mais concentrados no canto superior e inferior direito.

Essa faixa de propriedades é extremamente coerente com a debatida nesse trabalho, pois mostra que há, de fato, uma boa resistência mecânica e possibilidade de absorver grandes quantidades de energia. Isso foi colocado anteriormente como uma das motivações para o estudo dessas ligas para aplicações automobilísticas.

Figura 8 – propriedades mecânicas de ligas Fe-Mn-Al-C.



Fonte: Kim; Suh; Kim, 2013

Outro ponto relevante para o uso na indústria veicular que foi previamente proposto, é a correlação entre a adição de Mn e Al na redução da densidade dos automóveis e a consequente diminuição de sua massa. No gráfico da Figura 9 abaixo, fica claro ao leitor que essa dependência de fato existe.

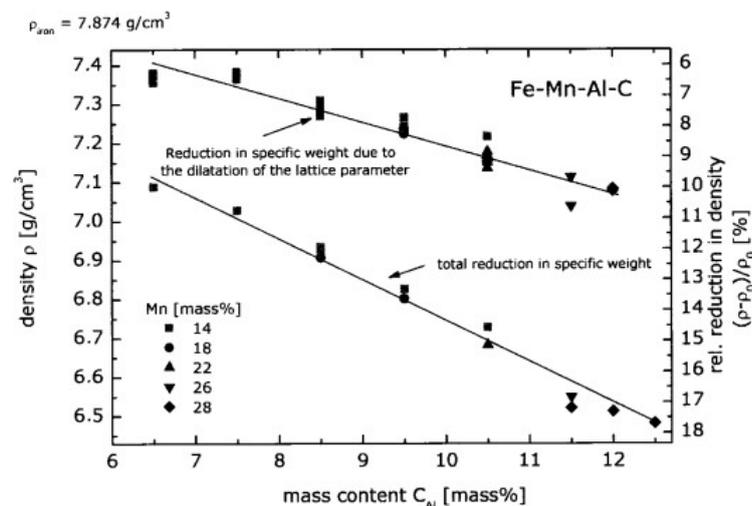
Nele, há uma função entre a densidade e a sua redução, ρ e $(\rho-\rho_0)/\rho_0$, respectivamente. É importante ressaltar que ela ocorre devido ao fato desses elementos de liga serem menos densos que o ferro e outros metais comuns em aços, como Ni e Cr. Porém, isso também se deve ao fato de o parâmetro de rede do sistema

aumentar. Isso é, uma célula unitária passa a ocupar mais espaço, ainda com a mesma massa.

Nesse contexto, o entendimento da influência dos elementos de liga nas propriedades mecânicas do material se torna de suma importância.

Assim, é possível observar no trabalho de Kim, Suh e Kim (2013) que a resistência do material aumenta com a adição de carbono. Porém, quando a matriz deixa de ser duplex e se torna puramente austenítica (por volta de 0,8% de C, em peso), a ductibilidade e o alongamento reduzem bruscamente. Isso se deve ao fato de haver precipitação do carboneto κ e ordenamento da estrutura cristalina, que ocorrem durante o resfriamento das amostras.

Figura 9 – Correlação entre a densidade e os teores de alumínio e manganês em ligas Fe-Mn-Al-C.



Fonte: Frommeyer e Brùx, 2006

Outro ponto no qual o aumento do teor carbono passa a ser deletério para as propriedades mecânicas é o potencial de encruamento. Isso pode ser percebido uma vez que a resistência à tração aumenta em uma taxa inferior se comparada à resistência ao escoamento. (Kim; Suh; Kim, 2013) Ainda no mesmo texto, os autores sugerem que a adição de Al aumenta a resistência, apesar de reduzir o alongamento.

Porém, para concentrações de alumínio em peso, entre 0 e 3%, a energia de falha de empilhamento aumenta, o que implica na não possibilidade de o material sofrer deformação por maclação. Como consequência a resistência à tração é

bruscamente reduzida.

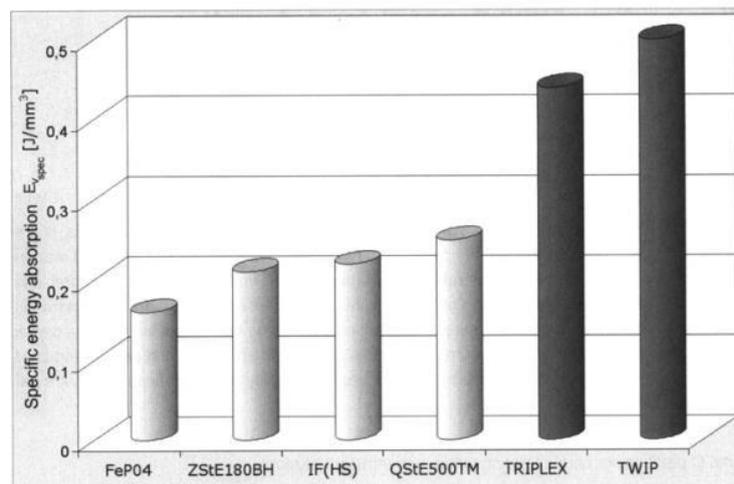
Em contrapartida, para valores de Al superiores a 3% em massa, a maclação é substituída pelo deslizamento planar como mecanismo de deformação, o que aumenta linearmente a resistência da liga. (Kim; Suh; Kim, 2013)

Ainda no mesmo trabalho, é apresentado o fato de que a partir de 20% em massa de manganês, não há quase nenhuma alteração nas propriedades mecânicas. Isso ocorre uma vez que, o Mn não possui influência direta na precipitação de carbonetos κ . Porém, para concentrações inferiores à 20%, a energia de falha de empilhamento aumenta com a adição de manganês. Isso é, há a transformação de aços TRIP para TWIP, aumentando a ductibilidade com a redução do limite de escoamento e a taxa de endurecimento. (Kim; Suh; Kim, 2013)

Outra propriedade já debatida e de suma importância para fornecer maior segurança aos passageiros de um veículo automotor é a absorção de energia, que está no gráfico de barras da Figura 10 abaixo separada por classes de aços.

Nele, é possível observar que os aços que sofrem deformação através do mecanismo de maclação (aços TWIP) são capazes de absorver mais energia durante um impacto.

Figura 10 – Absorção de energia por classes de aço, em J/mm^3



Fonte: Frommeyer e Brück, 2006

Outra questão relevante é a processabilidade das ligas Fe-Mn-Al-C dentro das exigências da indústria automobilística. Dentre as propriedades essenciais para a fabricação da carroceria de um automóvel se encontram a resistência à corrosão, dureza ao impacto, comportamento à fadiga, a formabilidade e a soldabilidade. (HORVATH, 2021)

Entretanto, a resistência a corrosão das ligas Fe-Mn-Al-C não é superior à das classes mais comuns de aços de alta resistência. (BASTIDAS, 2021)

Além disso, o módulo de Young é baixo em relação a outras possibilidades de materiais na indústria e, com a tecnologia que se dispõe atualmente, os aços Fe-Mn-Al-C só devem ser utilizados em regiões da carroceria onde a rigidez não é a propriedade principal a ser levada em conta.

Para as demais respostas mecânicas, ainda não há estudos experimentais satisfatórios para indicar sua aplicação. (HORVATH, 2021)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Como já citado no presente trabalho, um de seus objetivos gerais é o de fornecer um embasamento termodinâmico para ligas relevantes para aplicações na indústria automobilística.

Pensando nisso e na importância dos aços TWIP de baixa densidade para o setor (YAN, 2017), foram selecionadas três composições para avaliação por meio do software termodinâmico Thermocalc®.

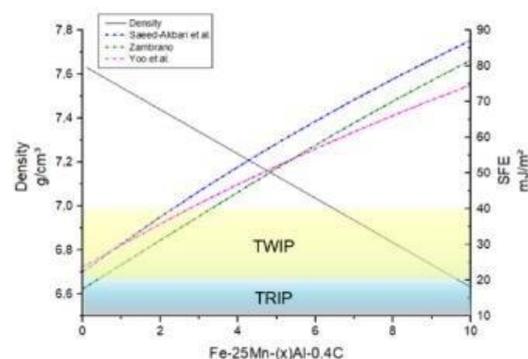
Essas ligas foram selecionadas de acordo com o gráfico presente na Figura 11, encontrado abaixo. A escolha foi feita com o objetivo de permanecer dentro da zona amarela e variando apenas o alumínio, que é o maior responsável pelo aumento das propriedades mecânicas relevantes para a manufatura de veículos automotores. (HORVAT, 2021)

As ligas selecionadas foram as seguintes:

- Fe-25Mn-3Al-C
- Fe-25Mn-5Al-C
- Fe-25Mn-8Al-C

A faixa de composição de Al permaneceu entre 3% e 8%, onde as propriedades não são deletérias para a aplicação. O teor de 5% em massa foi escolhido por se tratar de um valor intermediário.

Figura 11 – Densidade (em g/cm^3) e energia de falha de empilhamento em função da variação do teor de alumínio



Fonte: Vidili et al., 2020

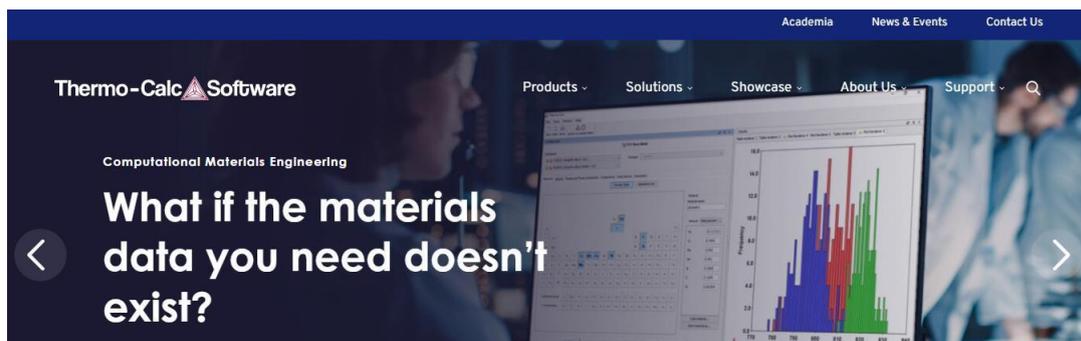
Com as ligas selecionadas, o próximo passo foi utilizar o software para obter os resultados.

O programa escolhido para colher informações termodinâmicas do sistema foi o ThermoCalc®, que pode ser adquirido através do site, exemplificado na imagem abaixo.

O ThermoCalc® [5] é um programa computacional, e um conjunto de bases de dados, que permite cálculos do equilíbrio termodinâmico, construção de diagramas de fase e avaliação crítica de dados termodinâmicos (GARZÓN e TSCHIPTSCHIN, p. 2, 2006).

Porém, é possível também utilizar uma versão gratuita para estudantes e instituições de ensino, o que foi feito no trabalho.

Figura 12 – ‘Print screen’ da tela inicial do endereço eletrônico do software TC.



Fonte: autoria própria

Inserindo os dados das ligas a serem analisadas, foi possível obter os dados desejados de densidade e fração de massa das fases formadas no estado sólido.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos resultados obtidos e mostrados na Figura 13 nota-se que, para as três composições, há a formação de ferrita (provavelmente a fase cúbica de face centrada, apresentada como BCC na legenda). De maneira análoga, ocorre a formação de austenita (FCC, na legenda) em temperaturas inferiores, culminando em uma microestrutura duplex (FCC + BCC). Outro ponto importante é o fato de que a cementita – fase de maior densidade – ocorre em maior fração em ligas de baixo teor Al, sendo detectada em todas as composições. Entretanto, isso ocorre apenas para baixas temperaturas entre 1050 e 1110°C.

Analisando a Figura 13(a) percebe-se que a fase austenita é predominante para a liga com menor teor de Al. Entretanto, com o aumento do teor desse metal, a fase favorecida é a ferrita. As duas observações são coerentes com o apresentado no capítulo de revisão bibliográfica (KIM; SUH; KIM, 2013); (ZAMBRANO, 2018); (XING, 2018); (JACOB et al., 2020); (VIDILLI et al., 2020).

Outra importantíssima observação é a de que a fase com menor densidade em g/cm³ é a ferrita. No gráfico encontrado na Figura 13 (a) - referente à composição de 3% de Al - a densidade da fase ferrítica (à 1388°C) é de 6,746g/cm³, sendo 6,932 a 1088°C e 6,993 g/cm³ a 1075°C para austenita e austenita + cementita, respectivamente.

Já na Figura 13 (c) observa-se que a densidade da ferrita (em 1405°C) é de 6,087 g/cm³. Como esperado, a densidade é reduzida com o aumento da temperatura, sendo 6,256g/cm³, 6,325g/cm³, 6,392 g/cm³ e 6,399 g/cm³ para 1302°C, 1144°C, 1123°C e 1121°C, respectivamente.

Sabe-se da literatura já citada que a ferrita é favorecida pelo alumínio em teores de até 6% em massa (GUTIERREZ-URRUTIA, 2017). Isso pode ser validado pelos dados obtidos na Figura 14, onde observa-se 29% de fração de ferrita para a liga Fe-25Mn-3Al-0,4C, 60,1% de fração de ferrita para a liga Fe-25Mn-5Al-0,4C e 76,3% de fração de ferrita para a liga Fe-25Mn-8Al-0,4C. É importante citar que não apenas o alumínio contribui para que isso ocorra, mas também o percentual em massa de Mn ser alto é importante nesse processo.

Figura 13 – Diagramas expressando a variação das densidades das fases em função da temperatura a partir do estado líquido em ligas Fe-25Mn-(3-8)-Al-C.

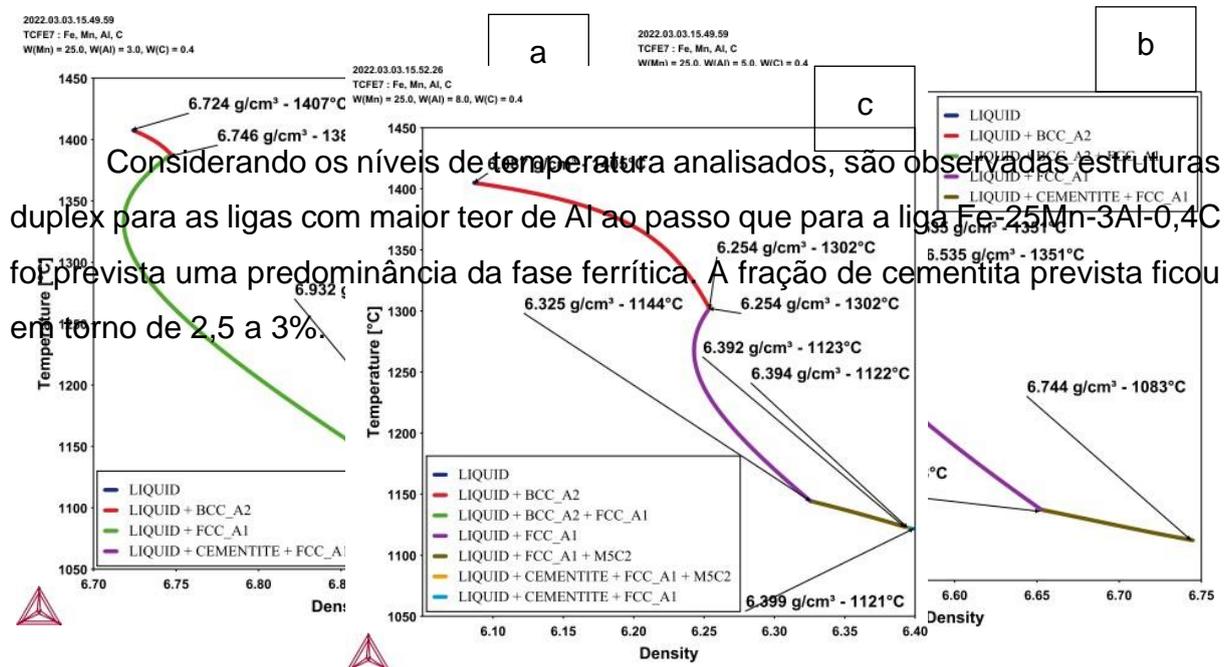
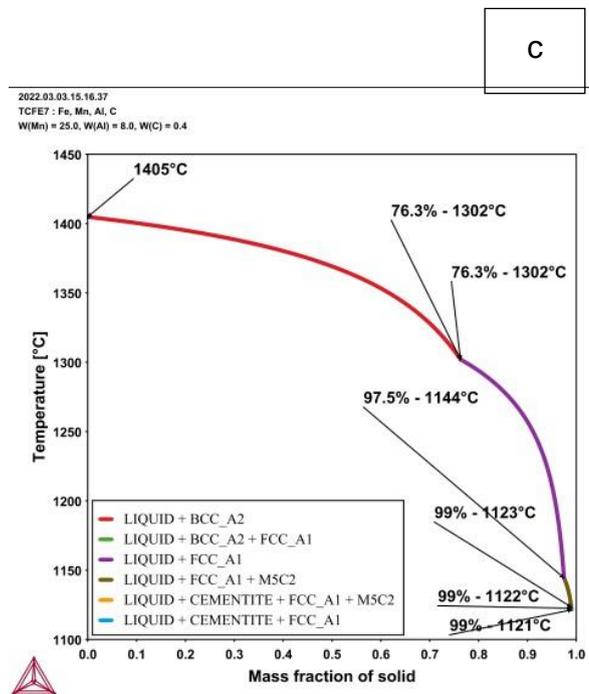
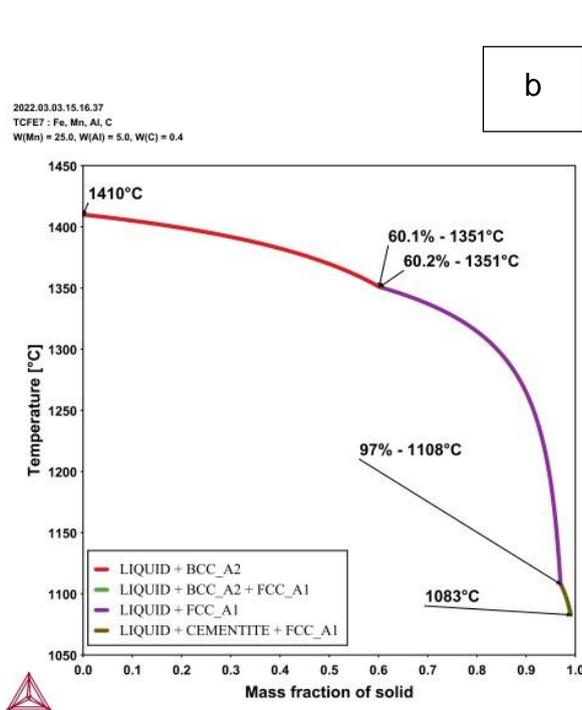
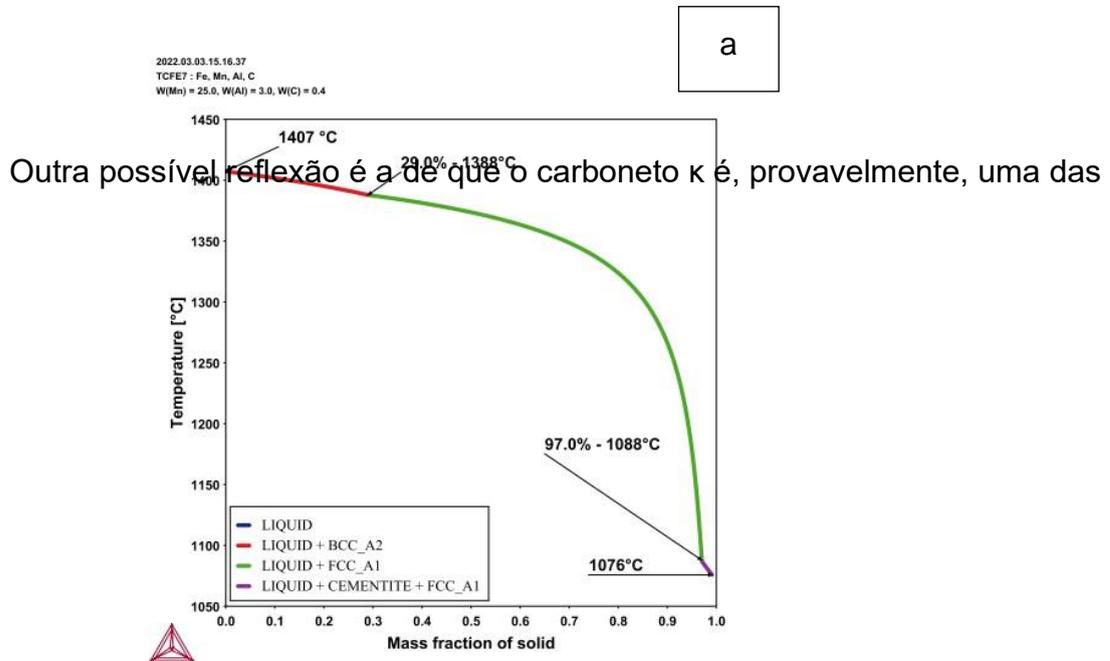


Figura 14 – Diagramas de Scheil mostrando o caminho de resfriamento e as fases formadas a partir do estado líquido para as ligas Fe-25Mn-(3-8)-Al-C.



fases FCC encontradas nos gráficos. Caso seja confirmado, é importante lembrar que tal precipitado é favorecido pelo aumento do teor de alumínio, sendo mais provável para a liga contendo 8 % de Al.

6 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentro do contexto social e ambiental apresentado nesse trabalho, é possível compreender que os sistemas Fe-Mn-Al-C podem vir a ser de suma importância para a indústria automobilística, ganhando espaço entre os aços TWIP e os avançados de alta resistência.

Felizmente, estudos bibliográficos suportam a possibilidade de tal aplicação. Porém, ainda é necessário maior estudo, especialmente experimentais.

Isso decorre do fato de que, as propriedades interessantes à indústria de veículos automotores não são plenamente compreendidas. Entretanto, uma das mais amplamente estudadas como a resistência a corrosão, é compreendida como satisfatória, enquanto a rigidez é um obstáculo.

O presente trabalho, dessa forma, se propôs a chamar a atenção e incentivar mais estudos sobre o tema, uma vez que os aços nos textos pesquisados são uma saída válida – porém não única – para o problema do aumento da eficiência do consumo de combustíveis fósseis por meio da redução da massa dos veículos automotores.

Como resultados desse trabalho foram obtidos, não apenas uma análise crítica da vasta literatura suportando suas premissas, mas também evidências obtidas através do software ThermoCalc®, confirmando alguns aspectos característicos das ligas Fe-Mn-Al-C.

As previsões da microestrutura, como esperado, apresentaram formação de austenita para temperaturas inferiores. A estrutura duplex em todas as concentrações avaliadas, o que pode resultar em processos de deformações preferenciais pelo mecanismo TWIP e sendo passíveis de endurecimento por precipitação de carbonetos. Além disso, é possível observar uma relevante redução da densidade nas ligas analisadas, com valores extraídos dos cálculos via Thermo-Calc. Ficou demonstrado que o uso do software Thermo-Calc pode ser de extrema importância no desenvolvimento dessas ligas e na extração de propriedades de interesse.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Primeira edição. Nova Iorque: Editora, 2014.

EPA. EPA: Carbon Monoxide (CO) Pollution in Outdoor Air, c2022. CO Pollution. Disponível em: <<https://epa.gov/co-pollution>>. Acesso em: 22 de mar. de 2022.

ZAMBRANO, O. A. A general perspective of Fe–Mn–Al–C steels. **Journal of Materials Science**, Colombia, 53, páginas 14003–14062, jun. 2018. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-018-2551-6>> Acesso em: 22 de mar. 2022.

FEKETE, J.R. 1 - Design of auto body: Materials perspective. **Automotive Steels**. Estados Unidos, 1, páginas 1-18, jan. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081006382000018>> Acesso em: 22 de mar. 2022.

XING, Jia. An Overview of the Effects of Alloying Elements on the Properties of Lightweight Fe-(15–35) Mn-(5–12) Al-(0.3–1.2) C Steel. **JOM**. Estados Unidos, 70, páginas 929–937, abr. 2018. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11837-018-2837-9>> Acesso em: 22 de mar. 2022.

BASTIDAS, David M. Corrosion Mechanisms of High-Mn Twinning-Induced Plasticity (TWIP) Steels: A Critical Review. **MDPI – Metals**. Estados Unidos, 11(2), páginas 287-331, fev. 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2075-4701/11/2/287>> Acesso em: 22 de mar. 2022.

KOYAMA, Motomichi e colab. Overview of hydrogen embrittlement in high-Mn steels. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 17, p. 12706–12723, 27 Abr 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319917308418>>. Acesso em: 23 mar 2022.

KIM, Sangshik e JEONG, Daeho e SUNG, Hyokyung. Reviews on factors affecting fatigue behavior of high-Mn steels. **Metals and Materials International**, v. 24, n. 1, p. 1–14, Jan 2018. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s12540-017-7459-1>> Acesso em: 23 mar 2022.

JACOB, R.; RAMAN SANKARANARAYANAN, S.; KUMARESH BABU, S.P. Recent advancements in manganese steels – A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 27, p. 2852–2858, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320303783>>. Acesso em: 23 mar 2022.

HORVATH, C.D. **Advanced steels for lightweight automotive structures.** *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, v. 2, n. 2, p. 39–95, 2021. Acesso em: 22 de mar. 2022.

MA, Yan. Medium-manganese steels processed by austenite-reverted-transformation annealing for automotive applications. **Materials Science and Technology**, v. 33, n. 15, p. 1713–1727, 12 Abr 2017. Acesso em: 23 de mar. 2022.

HERRMANN, Christoph e colab. Life cycle engineering of lightweight structures. **CIRP Annals**, v. 67, n. 2, p. 651–672, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850618301562>> Acesso em: 5 de mai. 2022.

KAWAJIRI, Kotaro e KOBAYASHI, Michio e SAKAMOTO, Kaito. Lightweight materials equal lightweight greenhouse gas emissions?: A historical analysis of greenhouse gases of vehicle material substitution. **Journal of Cleaner Production**, v. 253, p. 119805, Abr 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965261934675X>> Acesso em: 22 de mar. 2022.

KIM, Hansoo e SUH, Dong-Woo e KIM, Nack J. Fe–Al–Mn–C lightweight structural alloys: a review on the microstructures and mechanical properties. **Science and Technology of Advanced Materials**, v. 14, n. 1, p. 014205, Mar 2013. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1088/1468-6996/14/1/014205>>. Acesso em: 23 de mar 2022.

RAHNAMA, A. et al. Nano-mechanical properties of Fe-Mn-Al-C lightweight steels. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, 13 jun. 2018. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41598-018-27345-w>>. Acesso em: 22 de mar 2022.

FROMMEYER, G.; BRÜX, U. Microstructures and Mechanical Properties of High-Strength Fe-Mn-Al-C Light-Weight TRIPLEX Steels. **steel research international**, v. 77, n. 9-10, p. 627–633, set. 2006. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/279887981_Microstructures_and_mechanical_properties_of_high-strength_Fe-Mn-Al-C_light-weight_TRIPLEX_steels>. Acesso em: 22 de mar. 2022.

CHERUBINI, F.; RAUGEI, M.; ULGIATI, S. **LCA of magnesium production.** **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 8-9, p. 1093–1100, jul. 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344908000773>>. Acesso em: 22 de mar. 2022.

CHAVES, C. A.; MARQUES, S. DE A.; SILVA, W. DA S. E. BENEFÍCIOS DA RECICLAGEM DE MATERIAIS - O CASO DO ALUMÍNIO. **Revista Livre de**

Sustentabilidade e Empreendedorismo, v. 3, n. 3, p. 111–134, 3 jun. 2018.
Disponível em: < <http://www.relise.eco.br/index.php/relise/article/view/142>>. Acesso em: 22 de mar. 2022.

KÖSTER, W., TORN, W. Die Eisenecke des Systems Eisen-Mangan-Aluminium.
Arch Eisenhüttenwes. v. 7: p. 365-366, p.

VIDILLI, A. L. et al. Design of a FeMnAlC steel with TWIP effect and evaluation of its tensile and fatigue properties. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 831, n. 831, p. 154806, ago. 2020.

GARZÓN, C. M.; TSCHIPTSCHIN, A. P. Modelamento termodinâmico e cinético por meio do método Calphad do processamento térmico e termoquímico de aços.
Matéria (Rio de Janeiro), v. 11, n. 2, p. 70–87, 2006.

MONTAGNINI, Afonso Cardoso. Uma discussão sobre aços de Plasticidade Induzida por Maclação Mecânica (TWIP) aplicados na indústria automobilística. 2018. 82 f. **Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná**, Londrina, 2018.

HAM, J. L.; CAIRNS JR, R. E. Manganese joins aluminum to give strong stainless.
Product Engineering, v. 29, n. 52, p. 50-51, 1958.

HOWELL, R.; VAN AKEN, D. A Literature Review of Age Hardening Fe-Mn-Al-C Alloys. **AIST transactions**, v. 6, n. 3, [s.d.].

KAYAK, G. L. Fe-Mn-Al precipitation-hardening austenitic alloys. **Metal Science and Heat Treatment**, v. 11, n. 2, p. 95-97, 1969.

KIM, Young G.; PARK, Yee S.; HAN, Jae K. Low temperature mechanical behavior of microalloyed and controlled-rolled Fe-Mn-Al-CX alloys. **Metallurgical Transactions A**, v. 16, n. 9, p. 1689-1693, 1985.