

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FERNANDO BEGNINI
JOÃO PEDRO CAPPELLESSO**

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DO SAE D-5506
AUSTEMPERADO EM DIFERENTES TEMPERATURAS DE TRATAMENTO TÉRMICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2019

FERNANDO BEGNINI E JOÃO PEDRO CAPPELLESSO

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DO
SAE D-5506 AUSTEMPERADO EM DIFERENTES
TEMPERATURAS DE TRATAMENTO TÉRMICO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica – DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Profa. Dra. Maria Nalu Verona
Coorientador: Prof. Dr. Dalmarino Setti

PATO BRANCO

2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

Caracterização Mecânica e Microestrutural do SAE D-5506 Austemperado em Diferentes Temperaturas de Tratamento Térmico

Fernando Begnini

João Pedro Cappellesso

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 27/11/2019 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. Valdir Celestino da Silva
(UTFPR – Departamento de Engenharia Mecânica)

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
(UTFPR – Departamento de Engenharia Mecânica)

Prof. Dra. Maria Nalu Verona
(UTFPR – Departamento de Engenharia Mecânica)
Orientador

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, por permitir um acesso amplo ao conhecimento, ferramentas necessárias para nossa pesquisa e por permitir nosso desenvolvimento profissional.

Agradecemos a Professora Dra. Maria Nalu pela orientação, atenção e profissionalismo ao acompanhar esse trabalho.

Agradecemos ao Professor coordenador Dr. Dalmarino Setti, onde se envolveu afundo com essa pesquisa e deu um grande suporte para que esse trabalho se desenvolvesse e obtivesse resultados.

Agradecemos à Equipe Pato Baja, onde tivemos a oportunidade de participar durante nossa formação. Responsável por um grande conhecimento técnico e origem de muitas amizades ao longo do curso.

Eu Fernando Begnini, agradeço em especial aos amigos Ederson, André Mondo, Lucas Kiffuri, Marcos A. por acompanhar de perto o desenvolvimento desse trabalho e dar um grande suporte motivacional. Ao companheiro de trabalho João P.C, que demonstrou uma grande parceria de pesquisa, além de um grande amigo. Agradeço ao suporte familiar do meu pai Gilmar Begnini, e da minha mãe Janete Weber onde sem eles nada disso poderia ter acontecido.

Eu João Pedro Cappellesso, agradeço primeiramente aos meus pais Luis Pedro Cappellesso e Rosani Cappellesso, por todo o apoio e paciência durante minha trajetória. Aos colegas de curso que se tornaram amigos para a vida. Ao Fernando Begnini pelo companheirismo que teve início na equipe e se estendeu para este trabalho.

EPÍGRAFE

Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá. (SENNÁ, Ayrton).

RESUMO

BEGNINI, Fernando e CAPPELLESSO, João Pedro. Caracterização Mecânica e Microestrutural do SAE D-5506 Austemperado em Diferentes Temperaturas de Tratamento Térmico. 2019 - Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

O tratamento térmico de austêmpera em ferro fundido nodular tem sido objeto de estudo de pesquisadores por conferir vantagens comparativas com diversos materiais concorrentes, principalmente com relação a suas propriedades mecânicas semelhantes ou até superiores, como por exemplo ao ser comparado com o aço forjado. O principal foco deste trabalho foi determinar as propriedades mecânicas e a microestrutura do ferro fundido SAE D-5506 submetido a diferentes ciclos de Austêmpera, e comparar a Têmpera e Revenido submetida às mesmas variáveis. Como parte do processo houve a necessidade de realizar uma revisão de literatura para determinar as variáveis de estudo, realizar o planejamento dos ciclos de tratamento térmico de austêmpera e têmpera e revenido, projetar o molde e modelo para fundição e usinar os corpos de prova, realizar os ciclos de tratamento de austêmpera e têmpera e revenido, caracterizar os corpos de prova em relação a microscopia ótica, e fazer os ensaios de tração e de dureza. Resultados encontrados mostram a determinação das propriedades mecânicas do ferros fundido nodular, sendo exposto ao tratamento térmico caracterizado por 900 °C de austenitização e quatro variáveis de temperatura de austêmpera, sendo elas de 260, 300, 340 e 380 °C, e duas variáveis de temperatura de têmpera e revenido, sendo elas de 260 e 380 °C. Além de sua caracterização microestrutural, que mostra os efeitos que a temperatura causa no material, os dados mostram a superioridade das propriedades mecânicas da austêmpera sobre a têmpera e revenido e possível classificação do material conforme à norma ASTM A 897, a qual foi a principal utilizada para realização da pesquisa.

Palavras-chave: Ferro Fundido Nodular, SAE D-5506, Austêmpera.

ABSTRACT

BEGNINI, Fernando e CAPPELLESSO, João Pedro. Mechanical and Microstructural Characterization of SAE D-5506 Austempered at Different Heat Treatment Temperatures. 2019 - Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

Austempered ductile iron has been the object of study by researchers for showing comparative advantages with many competing materials, mainly with respect to its similar or superior mechanical properties, such as when compared to forged steel. The main focus of this work was determined as mechanical properties and microstructures of SAE D-5506 submitted to different Austemper cycles, and compared to Tempering subjected to the following variables. As part of the process there was the need to perform a literature review to determine the study variables, carry out the planning of the heat treatment cycles of austempering and tempering, design the mold and model for casting and machining the specimens, perform the austempering and tempering treatment cycles, characterize the specimens with respect to light microscopy, and perform the tensile and hardness tests. Results show the determination of the mechanical properties of nodular cast iron, being exposed to the heat treatment characterized by 900 ° C austenitization and four temperature variables of austemper, being 260, 300, 340 and 380 ° C, and two variables of tempering temperature, which is 260 and 380 ° C. In addition to its microstructural characterization, which shows the effects that temperature has on the material, the data show the superiority of austemper's mechanical properties over tempering and possible material classification according to ASTM A 897, which was the main one used. for conducting the research.

Keywords: Ductile Iron, SAE D-5506, Austempering.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação dos tipos de grafita para ferro fundido.....	18
Figura 2– Metalografia do ferro fundido nodular, nódulos de grafita e matriz Ferrítica/ Perlítica	20
Figura 3 - Diagrama esquemático das fases do tratamento de austêmpera para ADI	21
Figura 4 - Diagrama TTT de um processo de austempera.....	24
Figura 5 - Representação esquemática do crescimento de agulhas de ferrita (a partir do contorno de grão (CG) na austenita (γ_0) e criação de zonas de austenita com alto teor de carbono ($\gamma_{\text{Alto C}}$), no primeiro estágio.	25
Figura 6 - Ferro fundido nodular base, ferrita, perlita e nódulos de grafita	27
Figura 7 - Ferro fundido nodular austemperado (ADI), ferrita e nódulos de grafita ...	27
Figura 10 – a) Força de Tração x Temperatura de Austêmpera; b) Alongamento x Temperatura de Austêmpera.....	31
Figura 11 - Diagrama Temperatura X Carbono (%)	32
Figura 12 - Fluxograma	33
Figura 13 - Desenho técnico modelo Y 1/2".	36
Figura 14 - a) Modelo e caixa montados; b) Moldes fabricados em areia verde.	36
Figura 15 - a) Medalha final de vazamento; b) Espectrômetro SPECTRO MAX de emissão óptica.	37
Figura 16 - Corpo de prova de tração	38
Figura 17 - Processo de recartilhamento dos corpos de prova.	38
Figura 18 - Ciclo de Austêmpera.....	39
Figura 19 - Recipiente utilizado para o banho de sal.	40
Figura 20 - a) Mufla 2 para austenitização; b) Mufla 1 para o tratamento de austêmpera.	40
Figura 21 - Ciclo de Têmpera e Revenido.....	42
Figura 22 - Microscópio Óptico.....	43
Figura 23 - Durômetro Digimess (HRC).	44
Figura 24 - Máquina Universal de Ensaio.....	44
Figura 25 - Avaliação visual do bloco Y.	45
Figura 26 - Corpos de Prova	45
Figura 27 - Ferro fundido nodular bruto, com aumento em 400 vezes – Nital 3%.....	47

Figura 28 - Amostra austenitizada a 900 °C por 30 min e austemperada a 260 °C por 60 min – Nital 3%, (a) com 200x de aumento e (b) com 400x de aumento.....	47
Figura 29 - Amostra austenitizada a 900 °C por 30 min e austemperada a 300 °C por 60 min – Nital 3%, (a) com 200x de aumento e (b) com 400x de aumento.....	48
Figura 30 - Amostra austenitizada a 900 °C por 30 min e austemperada a 340 °C por 60 min – Nital 3%, (a) com 200x de aumento e (b) com 400x de aumento.....	48
Figura 31 - Amostra austenitizada a 900°C por 30 min e austemperada a 380 °C por 60 min – Nital 3%, (a) com 200x de aumento e (b) com 400x de aumento.....	49
Figura 32 - Amostra austenitizada a 900 °C por 30 min, temperada e revenida a 260 °C por 60 min – Nital 3%, (a) com 200x de aumento e (b) com 400x de aumento....	50
Figura 33 - Amostra austenitizada a 900 °C por 30 min, temperada e revenida a 380 °C por 60 min – Nital 3%, (a) com 200x de aumento e (b) com 400x de aumento....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Normas de ferro fundido nodular.....	20
Tabela 2 - Classes de ADI	28
Tabela 3 – Propriedades Mecânicas do ADI	30
Tabela 4 - Quantidade de corpos de prova necessária.....	34
Tabela 5 - Variável de temperatura	35
Tabela 6 - Composição química do SAE D-5506 (% em peso).....	37
Tabela 7– Dados obtidos	42
Tabela 8- Dados de alongamento, limite de resistência à tração e dureza.	46
Tabela 9 - Classificação conforme a norma ASTM A 897 do ADI.....	46

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADI	Austempered Ductile Iron
SAE	Society Automotive Engineers
CCC	Cubico de Corpo Centrado
CFC	Cubico de Face Centrada
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
TTT	Tempo Temperatura Transformação
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
CNC	Comando Numérico Computadorizado
HRC	Dureza Rockwell C

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.2 OBJETIVOS	15
1.2.1 Objetivo Principal	15
1.2.2 Objetivos Específicos	15
1.3 JUSTIFICATIVA	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 FERROS FUNDIDOS.....	17
2.1.1 Fases dos Ferros Fundidos.....	17
2.1.2 Classificação dos Ferros Fundidos	18
2.1.3 Especificações para o Ferro Fundido Nodular SAE D-5506.....	19
2.2 AUSTÊMPERA.....	21
2.2.1 Aspectos das transformações de fase na austêmpera.....	22
2.2.2 Microestrutura do Ferro Fundido Austemperado	26
2.2.3 Efeitos dos elementos de liga.....	29
2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADI	30
2.4 TÊMPERA E REVENIDO	31
3.METODOLOGIA (MATERIAIS E MÉTODOS)	33
3.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	34
3.1.1 Número de Corpos de prova	34
3.1.2 Temperaturas de Tratamento	34
3.2 MODELO E MOLDE.....	35
3.2.1 Projeto.....	35
3.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	36
3.3.1 Fundição.....	36
3.3.2 Usinagem	37
3.5 AUSTÊMPERA.....	39

3.5.1 Ciclo térmico.....	39
3.5.2 Equipamentos e materiais para Austêmpera.....	40
3.5.3 Cálculo da variação de temperatura do sal	41
3.6 TÊMPERA E REVENIDO	42
3.7 AVALIAÇÃO	43
3.7.1 Metalografia.....	43
3.7.2 Morfologia.....	43
3.7.3 Ensaio de Dureza	44
3.7.4 Ensaio de Tração	44
4.RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1 AVALIAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	45
4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	46
4.2 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA	47
5. CONCLUSÕES	52
REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

Descoberto nos anos 60 o ferro fundido nodular ampliou muito as possibilidades de aplicação do ferro fundido. Sua grande resistência mecânica e ductilidade, comparadas com o ferro fundido cinzento, juntamente com suas características de fundição, o tornaram um material muito competitivo quando comparado aos outros materiais. Antes da descoberta os projetistas tinham poucas opções para fabricar componentes de alto desempenho, usando o ferro fundido maleável, o aço fundido, o aço forjado ou mesmo soldado. Porém todos apresentavam limitações tanto no custo quanto às propriedades mecânicas atingidas. (BONETI, 2014).

Boneti (2014) diz que ainda na década de 60, ocorreu o surgimento dos ferros fundidos nodulares austemperados, porém, só ganharam destaque na década de 70. Assim as peças passaram a ter espessuras de paredes menores em relação aos ferros fundidos nodulares. Atualmente o *Austempered Ductile Iron* (ADI) substitui diversos materiais, principalmente os aços forjados, como componente estrutural de máquinas e veículos.

O ADI é resultado de um tratamento térmico, no qual, sua principal variação, está no fato de ser isotérmico. Após a obtenção da peça fundida, é realizado um aquecimento por um dado tempo até se obter uma austenitização homogênea do material, esta que depende das características químicas e de sua microestrutura. Em seguida se faz um resfriamento rápido do material, em um meio com alta capacidade de extração de calor. Esse meio é mantido a temperatura de austêmpera, de modo que a fase composta de austenita se transforme em ausferrita (combinação entre ferrita acicular e a austenita retida com alto teor de carbono), conferindo ao material propriedades mecânicas desejadas em componentes mecânicos.

Os parâmetros de tempo e temperatura de austêmpera tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores, uma vez que estes dois têm forte impacto sobre as propriedades mecânicas do ADI. O tempo de tratamento deve ser longo o suficiente, para que toda a austenita se transforme em ausferrita (ferrita e austenita com elevado teor de carbono), e curto, de modo que a austenita com alto teor de carbono, não se transforme em ferrita e carboneto (Fe_3C). Assim, a temperatura tem um impacto

considerável na microestrutura, deixando-a mais fina ou mais grosseira, alterando as propriedades do material.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal deste trabalho de conclusão de curso é determinar as propriedades mecânicas e a microestrutura do ferro fundido SAE D-5506 submetido a diferentes ciclos de Austêmpera e Têmpera e Revenido.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são os seguintes: (i) realizar uma revisão de literatura para determinar as variáveis de estudo; (ii) realizar o planejamento dos ciclos de tratamento térmico de austêmpera e têmpera e revenido (iii) projetar o molde e modelo para fundição dos corpos de prova e usinar os corpos de prova; (iv) realizar os ciclos de tratamento de austêmpera e têmpera e revenido; (v) caracterizar os corpos de prova em relação a microscopia ótica, ensaio de tração e de dureza.

1.3 JUSTIFICATIVA

O interesse em ferro fundido nodular dos acadêmicos, teve início através do desenvolvimento de componentes para o projeto de extensão da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Pato BAJA. Onde para alguns componentes vem sendo pesquisado maneiras de elevar a resistência mecânica do material, através do tratamento térmico de austêmpera.

Atualmente há indicações de tratamentos e suas microestruturas resultantes, com suas respectivas propriedades em corpos de provas. Porém dados e estudos dos ADI não são encontrados com facilidade, principalmente na literatura brasileira. Com algumas informações disponíveis, mesmo sendo bem fundamentadas, não são suficientes para a pesquisa tecnológica.

Aplicações que exijam maior resistência mecânica possibilitam a competição com materiais como aços forjados, temperados e revenidos além de aços

forjados. Relacionado com um baixo custo de produção, menor densidade do material, e boa capacidade de amortecimento graças aos nódulos de grafita.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FERROS FUNDIDOS

Conforme Chiaverini (1987), os ferros fundidos podem ser definidos como uma liga de ferro-carbono-silício, de teores de carbono geralmente acima de 2,0%, em quantidade superior à que pode ser retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar em carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita.

Já para Guessier (2009), os ferros fundidos podem ser definidos como ligas Fe-C-Si, englobando ainda Mn, S e P, podendo adicionalmente apresentar elementos de liga, que na solidificação apresentam geralmente uma fase pró-eutética (austenita, grafita) e que se completa com uma solidificação eutética (austenita + grafita ou austenita + carbonetos).

2.1.1 Fases dos Ferros Fundidos

Para Chiaverini (1987) e Magalhães (2011), podemos dividir em:

Ferrita - solução sólida de carbono e ferro no estado alotrópico do ferro puro, e se torna estável abaixo de 910 °C, tendo um sistema cristalográfico CCC. Também chamada de ferro alfa. É a forma mais pura do ferro, responsável por atribuir ductilidade e resiliência, além de abaixar a resistência mecânica e a dureza.

Austenita - uma solução sólida de carbono em ferro gama, possui estrutura cristalina FCC, se encontra entre as temperaturas de 727 °C e 1495 °C. Apresenta uma boa resistência mecânica e apreciável tenacidade e não é magnético.

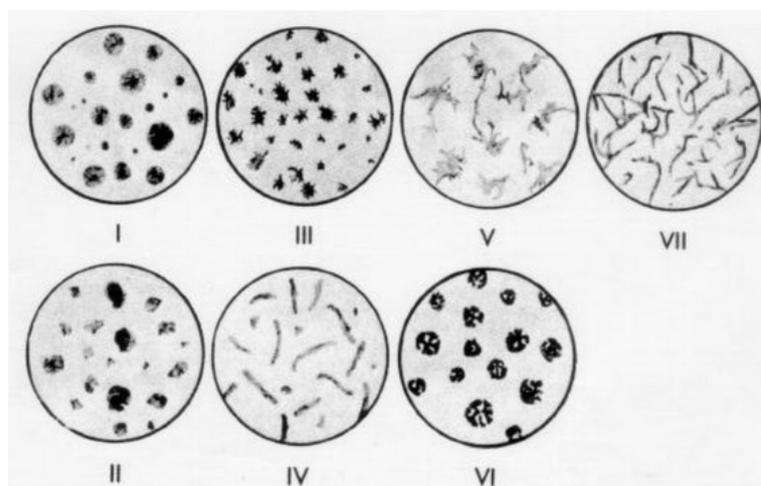
Perlita - apresenta-se na forma de lâminas finas dispostas alternadamente. É uma mistura mecânica de 11,5% de cementita e 88,5% de ferrita, na forma de lâminas finas disposta alternadamente. Nos ferros fundidos a perlita é responsável pela alta resistência e baixa ductilidade.

Grafita - característica dos ferros fundidos. É formada, praticamente por carbono puro disposto em camadas, podendo assumir diferentes formas, disposições e tamanhos. Possui baixa densidade, baixa dureza, alta condutividade térmica e propriedades lubrificantes. Na forma nodular ela age como inibidora de trincas.

2.1.2 Classificação dos Ferros Fundidos

Os ferros fundidos podem ser classificados pela norma ASTM A 247 de 1 a 7 (Figura 1), de acordo com sua estrutura, ou seja, variam com a quantidade e distribuição de grafita em sua matriz metálica, sua morfologia e ainda pelo tratamento e distribuição das células eutéticas.

Figura 1 - Classificação dos tipos de grafita para ferro fundido.



Fonte: Norma ASTM A 247.

Dentre esses arranjos estão o ferro fundido branco, ferro fundido nodular, ferro fundido vermicular, ferro fundido cinzento e o ferro fundido maleável). Citados abaixo, conforme Chiaverini (1987) e Vidal (2013):

Ferro Fundido Branco caracterizado por possuir uma baixa quantidade de silício em sua composição, e uma alta concentração de carbono na forma combinada de Fe_3C em sua estrutura, resultando assim em uma superfície de fratura em tonalidade clara. Suas principais características são a alta dureza e resistência ao desgaste, o que acaba restringindo muito sua usinabilidade. Utilizado como matéria prima para produção do ferro fundido maleável, além de ser usado em equipamentos para manuseio de terra, mineração e moagem, rodas de vagões, revestimentos e bolas de moinhos.

Ferro Fundido Nodular – sua característica principal é possuir grafita em forma de nódulos, distribuído em matriz ferrítica, perlítica ou ferrítica-perlítica. Possui ductilidade e alta resistência à tração. São utilizados em eixos de comando de válvulas, carcaças, componentes hidráulicos, engrenagens, coletores de exaustão,

peças de suspensão de veículos, tubulações e válvulas para transporte de água, entre outros.

Ferro Fundido Vermicular – possuem esse nome devido a ocorrência de carbonos livres de grafita parecidos com vermes. Essa característica se dá devido a presença de elementos de liga. Esses ferros possuem fundibilidade próxima aos ferros fundidos cinzentos, porém com melhor resistência mecânica e ainda alguma ductilidade, além de possuírem alta condutibilidade térmica. Utilizados em coletores de exaustão, blocos de motores diesel de novas gerações, caixas de engrenagens, suportes de mancais e rodas dentadas, lingoteiras, cárter, tubulações de exaustão e discos de freio.

Ferro Fundido Cinzento – é caracterizado por possuir uma alta concentração de silício, e ter carbonos livre em formas de veios de grafita, assim fornecendo boa condutividade térmica e capacidade de absorver vibrações. São materiais com boa usinabilidade e baixo alongamento. Utilizado em componentes sujeitos a fadiga térmica (tambores e discos de freio, cabeçotes de motor), bases de máquinas e equipamentos, além de aplicações com restrições de ruído.

Ferro Fundido Maleável – tem origem do processo de tratamento térmico de maleabilização do ferro fundido branco, onde a cementita do material se transforma em grafita e austenita. Possuem uma boa usinabilidade e ductilidade maior que os ferros fundidos cinzentos. Utilizados na produção conexões para tubulações hidráulicas, conexões para linhas de transmissão elétrica, sapatas de freios entre outros.

2.1.3 Especificações para o Ferro Fundido Nodular SAE D-5506

Atualmente existem uma gama de classificações por diversas associações, empresas, e institutos de pesquisa. Porém, o objeto deste trabalho é a obtenção de um componente seguindo a norma SAE J434. Esta abrange requisitos referentes a microestrutura e propriedades mecânicas do ferro fundido nodular utilizado na indústria automotiva e afins.

Esse material possui outras nomenclaturas, como as encontradas nas normas ABNT NBR 6916 - classe FE 50007 e ASTM A 536 (Tabela 1), além de outras normas equivalentes.

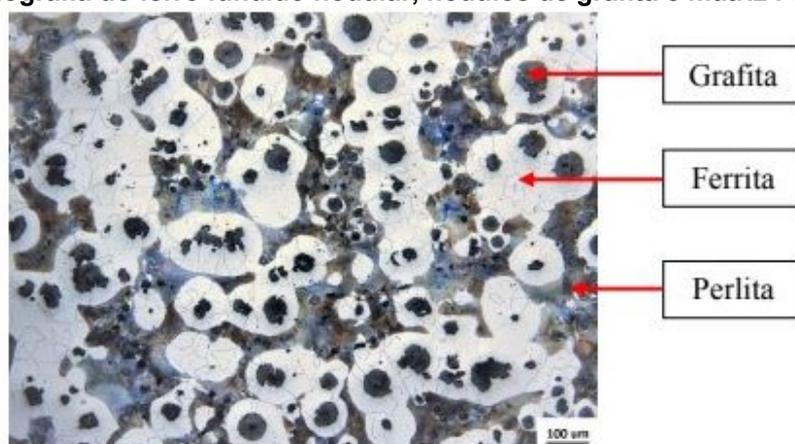
Tabela 1 - Normas de ferro fundido nodular

NORMA NODULAR (GRAFITA ESFEROIDAL)						
EQUIVALÊNCIA	ABNT NBR 6916/ NBR 8650	FE-38017	FE-42012	FE-50007	FE-60003	FE-70002
	ASTM A-536	60.40.18	65.45.12	80.55.06	80.55.06	100.70.03
	DIN EN 1563	EN-GJS-400-18	EN-GJS-400-15	EN-GJS-500-7	EN-GJS-600-3	EN-GJS700-2
	SAE J-434	D-4018	D-4512	D-5506	-	D-7003
	DIN 1693	GGG-40.3	GGG-40	GGG-50	GGG-60	GGG-70
COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)	C (A)	3,40 - 3,80	3,40 - 3,80	3,40 - 3,80	3,40 - 3,80	3,40 - 3,80
	Si (A)	2,10 - 2,80	2,10 - 2,50	2,30 - 2,80	2,50 - 2,80	2,30 - 2,80
	Mn (A)	0,30 Máx	0,30 Máx	0,50 Máx	0,50 Máx	1,0 Máx
	P	0,09 Máx	0,09 Máx	0,09 Máx	0,09 Máx	0,09 Máx
	S	0,02 Máx	0,02 Máx	0,02 Máx	0,02 Máx	0,02 Máx
	Cu (A)	-	-	0,20 - 0,70	0,50 - 1,00	0,50 - 1,00
	Mg (A)	0,04 - 0,06	0,04 - 0,06	0,04 - 0,06	0,04 - 0,06	0,04 - 0,06
PROPRIEDADES	DUREZA (HB)	140 - 170	156 - 200	187 - 240	210 - 280	241 - 300
	RESISTÊNCIA TRAÇÃO MÍN (MPa)	380	420	500	600	700
	ESCOAMENTO MÍN (MPa)	240	280	350	400	450
	ALONGAMENTO MÍN (%)	17	12	7	3	2
	MATRIZ PREDOMINANTE	Ferrítica	Ferrítica	Perlítica/Ferrítica	Perlítica	Perlítica

Fonte: Keough (1998)

O D-5506 é caracterizado por conter grafita do tipo | e || (Figura 1), matriz perlítica e ferrítica (Figura 2). Utilizado em componentes que necessitam alta resistência mecânica à tração e resistência ao desgaste, possuindo bom acabamento e boa temperabilidade para realização de tratamento térmico. Suas propriedades mecânicas proporcionam a substituição de peças de aço, como o SAE 1030/1040, em engrenagens, eixos, hastes de pistão, etc. (MAXFER, 2017).

Figura 2– Metalografia do ferro fundido nodular, nódulos de grafita e matriz Ferrítica/ Perlítica



Fonte – Jucumasso (2018)

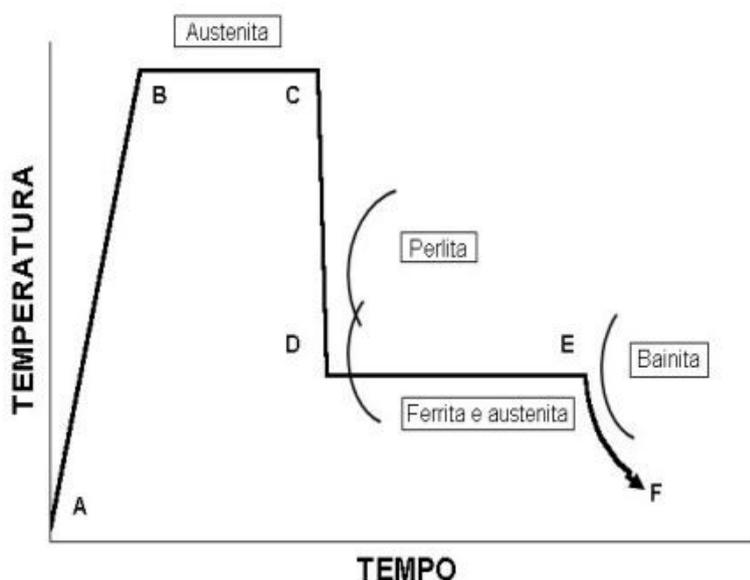
2.2 AUSTÊMPERA

O tratamento de austêmpera (também denominado como “tempera a quente”) é muito empregado em aços que possuem um elevado teor de carbono. Aplicado também em peças de ferro fundido que possuem forma complexa, sendo que o tratamento mais usual de têmpera pode levar ao empenamento e fissuração da peça após tratamento (CHIAVERINI, 2003).

Simplificando a austêmpera pode ser definida como tratamento isotérmico utilizado para transformar a austenita em ferrita acicular e austenita retida, tendo como principais parâmetros o tempo e a temperatura de tratamento. Estes juntos com a composição química do material impactam de forma significativa nas propriedades mecânicas, resistência ao desgaste e dureza do metal.

O tratamento de austêmpera pode ser dividido em etapas de modo a conseguir um melhor entendimento. Kovacs (1990) utiliza um diagrama esquemático do ciclo de tratamento do ADI (Figura 3) para demonstrar as etapas.

Figura 3 - Diagrama esquemático das fases do tratamento de austêmpera para ADI



Fonte: Kovacs (1990)

Inicialmente após a produção de uma peça com geometria próxima a do componente finalizado o material é aquecido, em um forno para tratamento, de modo a promover a austenitização, entre 850 °C e 950 °C (AB). Em seguida é mantida nesta temperatura por um período de três horas para que ocorra a austenitização da matriz

de forma homogênea (BC). A temperatura e o tempo desta etapa são críticos na determinação do teor de carbono da matriz de austenita, que até o final desta etapa deve ficar supersaturada de carbono, para posterior transformação isotérmica a temperaturas mais baixas (THOMSON, JAMES e PUTMAN, 2000).

Após a austenitização completa, deve ser realizado o resfriamento de maneira abrupta (CD), levando o material a uma temperatura entre 230 °C e 400 °C dependendo das características requisitadas do material. Este resfriamento ocorre normalmente em salmoura, onde o material passa o tempo de tratamento necessário para obter as características desejadas (DE).

A transformação da austenita supersaturada (γ_o) começa com a formação de “agulhas” de ferrita (α) e saturação das porções austeníticas remanescentes com carbono levando a estabilização da austenita retida (γ_H), por meio de um mecanismo de difusão (BDG, 2007). Segundo Thomson, James e Putman (2000) isso leva a um aumento no teor de carbono da austenita e como consequência uma redução na diferença de energia de Gibbs entre as duas fases, que é a força motriz da reação.

A transformação sem difusão cessa quando a força motriz atinge zero, levando ao "fenômeno da reação incompleta". Logo este tratamento é uma transformação isotérmica incompleta da austenita. Após o resfriamento do banho de sal até a temperatura ambiente (EF), obtém-se uma estrutura básica de ferrita fina e elevado teor de austenita não transformada de até 40%.

2.2.1 Aspectos das transformações de fase na austêmpera

Conforme descrito anteriormente a etapa inicial da austêmpera é elevar a temperatura do material fundido até atingir a austenitização de forma homogênea, onde ocorre a transformação de toda a ferrita e perlita oriunda da fundição em austenita, com o carbono distribuído de forma uniforme.

Harding (2007) descreve em seu trabalho que essa distribuição do carbono está relacionada com a temperatura e tempo de austenitização, além de afetar a próxima transformação do material em ferrita. Parâmetros típicos de austenitização são 1 hora a 900 °C, no entanto, deve-se notar que a temperatura crítica superior varia com a composição, particularmente com o teor de Si, portanto, isso deve ser

controlado adequadamente para evitar a necessidade de ajustar a temperatura de austenitização.

Se utilizada uma temperatura elevada, ocorre um aumento da porcentagem de carbono na austenita. Isso ajudará na formação de martensita no interior dos grãos de austenita, reduzindo assim propriedades mecânicas como ductilidade e tenacidade (CAMPIGOTTO, 2018).

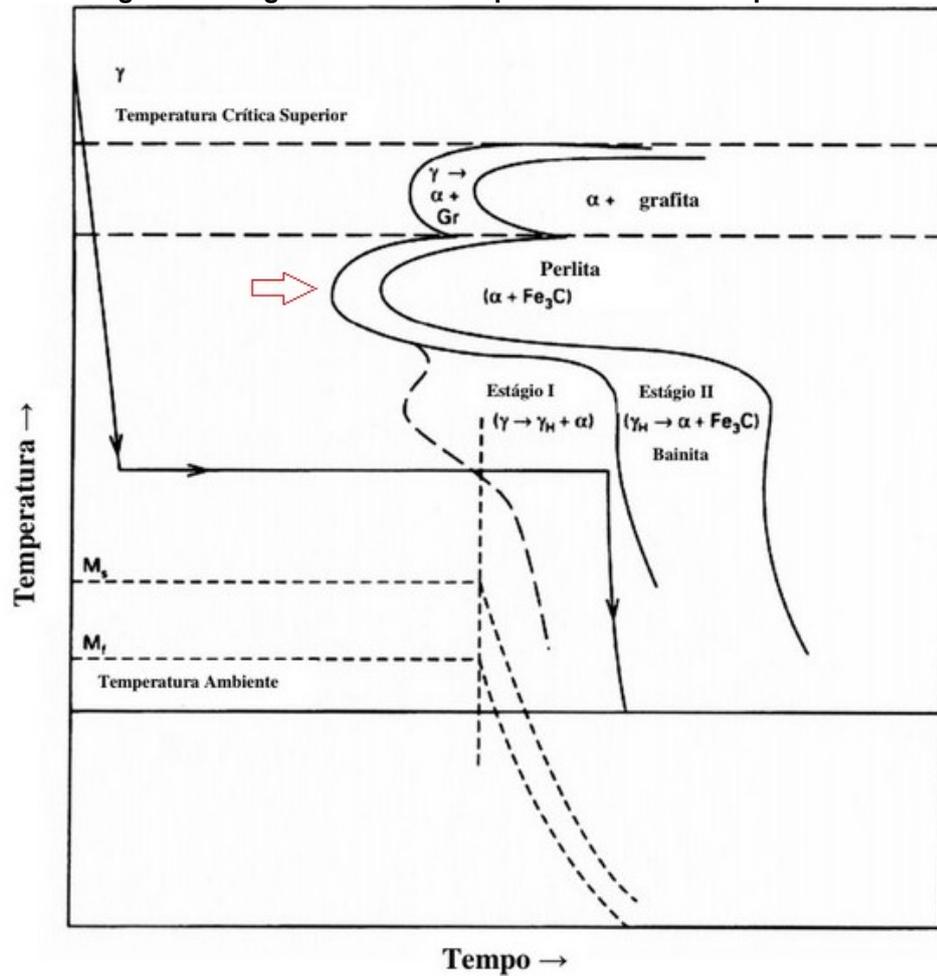
No caso do tempo de austenitização, Harding (2007) comenta que depende de 3 variáveis principais, sendo elas a espessura de componentes, a quantidade de nódulos e a microestrutura inicial do ferro fundido após o vazamento e solidificação:

- Para peças com espessura maiores é necessário um tempo maior de “encharque” (tempo necessário para austenitização completa).
- Em ferros nodulares com maior quantidade de nódulos o tempo de austenitização é reduzido, uma vez que a distância que o carbono precisa percorrer fica menor para ter um conteúdo uniforme.
- A microestrutura inicial do ferro fundido após o vazamento e solidificação interfere na austenitização sendo que ocorre de forma mais rápida em uma matriz perlítica.

Após a austenitização completa é realizado um resfriamento isotérmico, de modo que não ocorra a formação de perlita, logo a linha que indica o caminho do tratamento deve ficar afastada da região de formação perlítica (Figura 4). As peças devem ser transferidas rapidamente para um meio de resfriamento, com alta capacidade de extração de calor garantindo assim a microestrutura desejada.

O tratamento de austêmpera pode ser dividido em dois estágios. O diagrama TTT (Tempo - Temperatura - Transformação), mostrado na Figura 4, permite uma melhor visualização das transformações.

Figura 4 - Diagrama TTT de um processo de austempera



Fonte: Machado (2007)

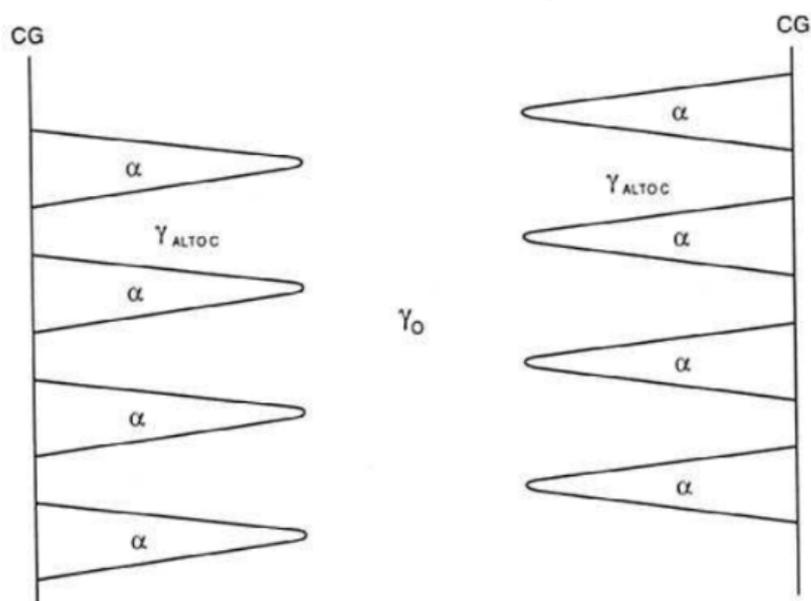
O primeiro estágio da reação de austempera, como na equação (1), se inicia durante a transformação isotérmica, quando na matriz que estava austenitizada, começa a se formar plaquetas ou “agulhas” de ferrita através do mecanismo de nucleação nos contornos de grãos da grafita ou no interior da austenita além do crescimento da ferrita no mesmo (Figura 4). Estas plaquetas de ferrita são separadas devido ao carbono segregado da ferrita por conta da diferença de solubilidade entre γ e α , o qual acaba enriquecendo a austenita não transformada γ_H por difusão (CARMO, 2003).



Se os componentes fundidos forem mantidos por tempo suficiente, a temperatura M_s é pressionada para baixo da temperatura ambiente (Figura 5). Com isso, a estrutura final será constituída de feixes de plaquetas de ferrita fixados em uma

matriz de austenita retida, que foi estabilizada por conta do elevado teor de carbono γ_H , chamada de ausferrita. O final do Estágio I é definido como o momento em que não há martensita na estrutura na temperatura ambiente (HARDING, 2007).

Figura 5 - Representação esquemática do crescimento de agulhas de ferrita (a partir do contorno de grão (CG) na austenita (γ_o) e criação de zonas de austenita com alto teor de carbono ($\gamma_{ALTO C}$), no primeiro estágio.



Fonte: Carmo (2003)

Se a peça é mantida na temperatura de austêmpera por muito tempo, então ocorre uma segunda reação, o segundo estágio como na equação (2). A austenita com alto valor de carbono γ_H e com alta pureza, se decompõe ainda mais em ferrita e carboneto. Esta reação é indesejável pois produz fragilização no ADI, com a perda de ductilidade e tenacidade (PUTATUNDA, 2010).



O teor de austenita em relação à ferrita assume seu maior nível na faixa de temperatura de 350 a 370 °C, e então o ferro fundido apresenta o maior alongamento e menor resistência mecânica. Se reduzida a temperatura de austêmpera ainda mais, a estrutura do componente conterà martensita. Este que é o efeito da transformação da austenita residual proveniente da precipitação durante o resfriamento até a temperatura ambiente (PUTATUNDA, 2010).

Além da temperatura do processo, a estrutura do ferro fundido também depende do tempo de tratamento. De modo semelhante, existe um tempo ótimo de austêmpera, possibilitando de um lado o enriquecimento da austenita em carbono de forma adequada, sendo esse o tempo do próprio tratamento. Por outro lado, tempo excessivo do processo impede a decomposição da austenita e a formação de carbonetos. (D. WILK-KOŁODZIEJCZYK et al, 2016).

Este processo pode ser comparado a bainita inferior formada em aços durante o tratamento, levando a um material com elevada dureza, mas tendo ductilidade e tenacidade relativamente baixas. Podendo ser produzidas uma variedade de estruturas com matriz contendo ausferrita, apenas variando a temperatura de austêmpera ocorrem diferentes quantidades e proporções de ferrita e austenita retida, essas diferentes estruturas controlam as propriedades mecânicas obtidas (HARDING, 2007).

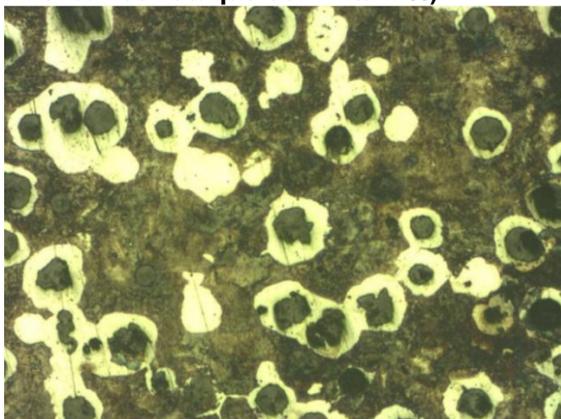
Portanto, um tratamento bem-sucedido de austêmpera em ferro deve ser realizado entre os estágios, que é conhecido como a janela de processo. Esta é definida como o intervalo de tempo entre o final do primeiro estágio e o início do segundo. Elementos de liga como o níquel e o molibdênio são adicionados no ferro fundido nodular, para ampliar esta janela de transformação.

2.2.2 Microestrutura do Ferro Fundido Austemperado

Como citado anteriormente a principal característica do ferro fundido nodular é a presença de grafita na forma de nódulos. Com a microscopia é possível ter uma melhor visualização da microestrutura do material. Vinayak (2018) realizou a austêmpera em um ferro fundido nodular e fez uma comparação entre as micrografias do material antes e depois do tratamento.

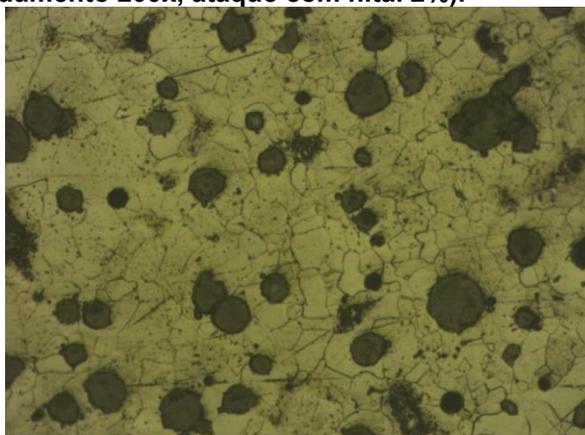
A Figura 6 mostra nódulos de grafite embutidos em ferrita rodeados por matriz de perlita, portanto, é chamado como ferro dúctil perlítico. A Figura 6 mostra a microestrutura óptica do ferro fundido nodular tratado termicamente, nela pode ser notado os nódulos de grafite rodeados por matriz de ferrita e alguns pequenos fragmentos de perlita. Devido ao tratamento térmico, a matriz de perlita é convertida em ferrita acicular e austenita retida (essa é a ausferrita).

Figura 6 - Ferro fundido nodular base, ferrita, perlita e nódulos de grafita (aumento 200x ataque com nital 2%).



Fonte: Vinayak (2018)

Figura 7 - Ferro fundido nodular austemperado (ADI), ferrita e nódulos de grafita (aumento 200x, ataque com nital 2%).



Fonte: Vinayak (2018)

Como apresentado anteriormente as diferenças nas propriedades mecânicas dos diferentes tipos de ADI (usando o mesmo material base), estão associadas a diferenças na estrutura resultante, por sua vez, de diferentes parâmetros de tratamento térmico. A modelagem de propriedades de ADI pode ser obtida através do controle de parâmetros como temperatura de austenitização e austêmpera.

As variações das propriedades, faixa de alongamento e resistência a tração, dos cinco graus de ADI padrão da ASTM pode ser visto na Tabela 2. Os níveis de resistência a tração e alongamento variam respectivamente de 850 MPa e 10% a 1600 MPa e menos de 1% e são determinados pela temperatura de austêmpera.

Tratamento a uma alta temperatura de austêmpera, produz um componente com excelente ductilidade e propriedades para esforços dinâmicos, enquanto uma baixa temperatura resulta em uma parte com muito alta resistência

mecânica e resistência ao desgaste. Tais efeitos da temperatura de austêmpera estão relacionados a mudanças microestruturais.

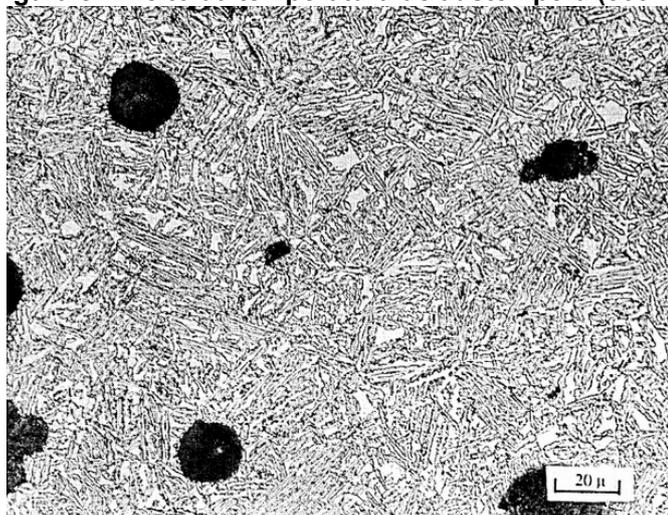
Tabela 2 - Classes de ADI

ASTM 897 (in-lb units)	125 80 10	150 100 07	175 125 04	200 155 01	230 185 00
ASTM 897M (SI units)	850 550 10	1050 700 07	1200 850 04	1400 1100 01	1600 1300 00
"Grade"	1	2	3	4	5
Property					
Min. Tensile Strength (ksi/MPa)	125/850	150/1050	175/1200	200/1400	230/1600
Min. 0.2% Offset Yield Strength (ksi/MPa)	80/550	100/700	125/850	155/1100	185/1300
Min. Elongation (% in 2 in/50mm gage)	10	7	4	1	n/a
Typical Brinell Hardness (BID mm)	302 (3.50)	340 (3.30)	387 (3.10)	418 (3.00)	460 (2.85)
Typical Density (lb./in ³ / g/ cm ³)	.2562/7.0965	.2555/7.0779	.2555/7.0779	.2552/7.0686	.2548/7.0593
Typical Thermal expansion (in/in/F / mm/mm/C)	8.1/14.6	8.0/14.3	7.8/14.0	7.7/13.8	7.5/13.5

Fonte: ASTM Specification 897M-90

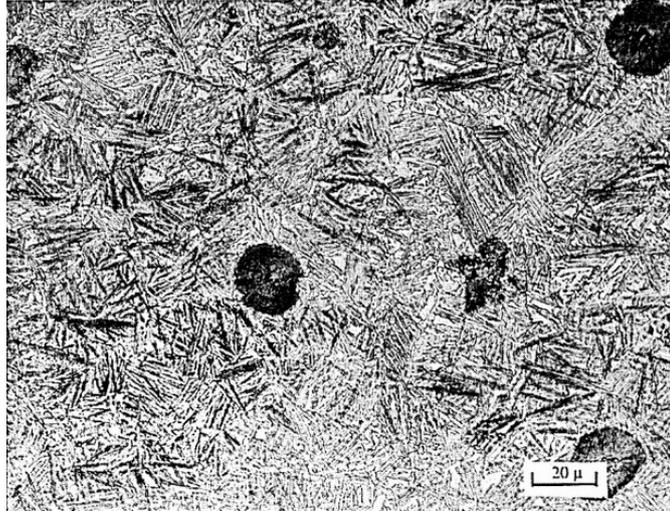
Trudel e Gagné (2013) realizaram o tratamento do ADI, (com composição 3.5% C, 2.5% Si, 1.5% Ni, 0.8% Cu), variando a temperatura de austêmpera mantendo o tempo igual a uma hora. Como mostrado na Figura 8, na temperatura de 360 °C, o resultado é microestrutura grossa com uma quantidade razoavelmente grande de austenita. A redução da temperatura de austêmpera para 310 °C favorece a formação de uma microestrutura mais fina com ilhotas de austenita isoladas e menores (Figura 9). Com uma temperatura de austêmpera mais baixa resulta em um grande subresfriamento da austenita e uma lenta taxa de difusão do carbono, a nucleação das placas de ferrita, é favorecida, em vez de seu crescimento, resultando em uma estrutura mais fina.

Figura 8 - Efeito da temperatura de austêmpera (360 °C).



Fonte: Trudel e Gagné (2013)

Figura 9 - Efeito da temperatura de austêmpera (310 °C).



Fonte: Trudel e Gagné (2013)

2.2.3 Efeitos dos elementos de liga

Com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas dos materiais, elementos de ligas se tornam uma ótima alternativa. Segundo Rosário (2012), a influência desses elementos se dá devido a alteração da microestrutura. Os elementos são adicionados juntamente com os materiais de carga, no banho líquido no forno, em antecadinho, na panela de vazamento ou após um processo de tratamento térmico, facilitando muito, assim, o aumento da qualidade dos ferros fundidos.

No ADI ou mesmo no ferro fundido sem qualquer tratamento, os elementos de liga podem ser utilizados combinados ou individualmente, podendo afetar a solubilidade do carbono na austenita, ou influenciar a velocidade da transformação de fase na austêmpera. Caracterizados por facilitar a austêmpera na liga e possibilitar a obtenção da estrutura ausferrítica sem a presença de perlita, o que irá influenciar diretamente nas propriedades mecânicas do material. (RODRIGUES, 2016).

No caso dos ferros fundidos nodulares para se obter a grafita em nódulos é preciso utilizar elementos químicos nodularizantes, como por exemplo, o magnésio e/ou cério, gerando ao ferro fundido nodular alta ductilidade para matriz ferrítica. (GUESSER, 2009)

Conforme Keough (1998), o controle de carbono, silício e os principais elementos de liga são essenciais para controlar a temperabilidade do ferro e as propriedades da microestrutura transformada. Como podemos ver logo em seguida.

Carbono - na faixa de 3 a 4%, faz com que ocorre o aumento da resistência à tração, porém esse aumento prejudica o alongamento e a dureza do material.

Silício - necessário ser controlado na faixa de 2,4 e 2,8%, é muito importante no ADI, pois promove a formação de grafita, diminui a solubilidade do carbono na austenita, aumenta a temperatura do eutetóide e inibe a formação de carboneto bainítico. Além de aumentar a resistência ao impacto e diminuir a temperatura de transição dúctil-frágil.

Manganês - recomendável restringir em menos de 0,3%. Aumenta a temperabilidade, mas durante a solidificação retarda a reação de austêmpera. Com isso, em peças com contagem de nódulos baixos ou tamanhos de seção maiores que 19 mm, a segregação de manganês pode produzir retração, carbonetos e austenita instável. Isso faz com que se diminua a usinabilidade e as propriedades mecânicas.

Cobre - pode se adicionar até 0,8% de cobre no ADI para se aumentar a temperabilidade. Não possui efeito significativo nas propriedades de tração, mas aumenta a ductilidade a temperaturas acima de 350 °C.

2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADI

Seu limite de escoamento é cerca de duas vezes maior que os ferros fundidos nodulares sem tratamento (GUESSER,2009). Possui uma boa relação entre a resistência mecânica e densidade, com uma boa resistência à fadiga. Sua densidade é 10% menor que a do aço, podendo substituir componentes de aço forjados, conjuntos soldados e fundidos com redução de peso e custos. (MACHADO,2007).

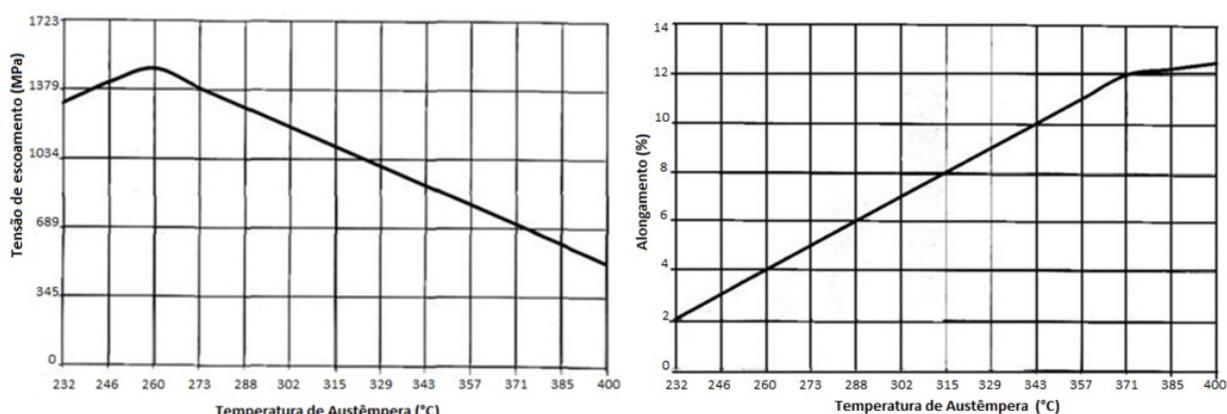
Tabela 3 – Propriedades Mecânicas do ADI

Limite de resistência [MPa]	800 – 1600
Limite de escoamento a 0,2% [MPa]	500 – 1500
Alongamento [%]	1 – 16
Módulo de elasticidade longitudinal [GPa]	150 – 162
Dureza [Brinell]	250 – 550
Resistência à fadiga [MPa] *	310 – 690
Resistência ao impacto [J/cm ²]	25 – 170
Resistência ao desgaste [volume perdido em mm ³]**	9 – 10

Fonte: ASTM Specification 897M90.

Como aponta Keough (1998), os ADI são um grupo de materiais onde as propriedades podem variar dependendo do tratamento térmico. A Figura 10a e 10b mostra a correlação entre a temperatura de austêmpera e as propriedades de tração. Quando o tratamento de austêmpera é feito à cerca de 400 °C, ocorre alta ductilidade no material, uma tensão de escoamento na faixa de 500 MPa, e boa resistência ao impacto. Já quando o tratamento é feito a temperatura mais baixa, cerca de 260 °C, a tensão de escoamento se torna bem alta, sendo por volta de 1400 MPa, e também terá elevada dureza.

Figura 8 – a) Força de Tração x Temperatura de Austêmpera; b) Alongamento x Temperatura de Austêmpera.



Fonte: Keough (1998).

2.4 TÊMPERA E REVENIDO

O intuito de estudo de têmpera e revenido, faz necessário a fim de comparação das propriedades mecânicas encontradas na austêmpera. Como este tratamento térmico é a principal alternativa à austêmpera, mesmo não sendo muito consolidado, analisaremos brevemente suas características e aplicações.

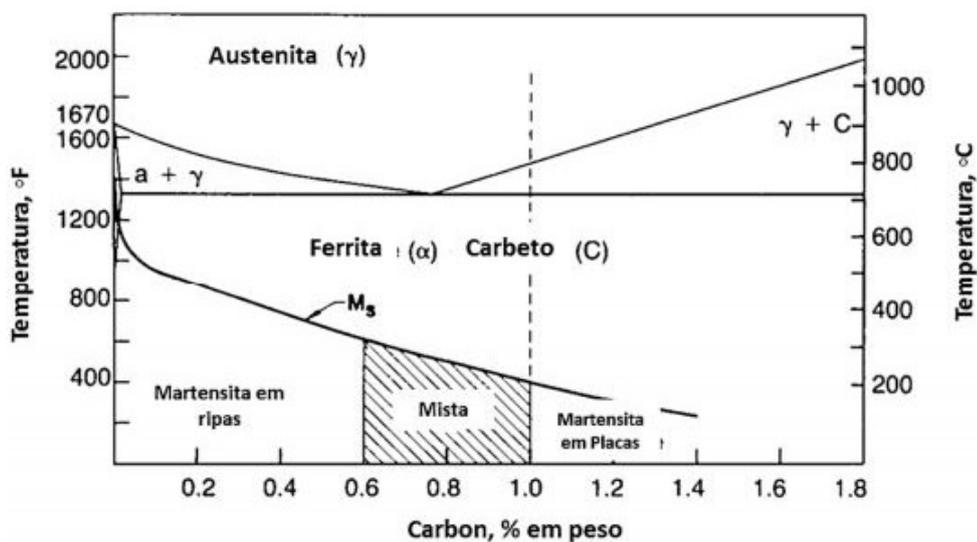
Souza (2014), cita que o conceito de têmpera e revenido vem da transformação parcial da austenita em martensita, através da têmpera em temperaturas entre a temperatura inicial e final da martensita.

Após a têmpera o material deve passar pelo processo de revenimento, que é realizado a temperaturas inferiores às de transformação. A temperatura depende das características mecânicas solicitadas para o material, o revenido proporciona a redução da fragilidade, alívio de tensões residuais, redução na dureza e um incremento na resistência mecânica e tenacidade. O aumento da tenacidade está

relacionado ao rearranjo dos átomos de carbono a tetragonalidade encontrada na martensita. (CHIAVERINI,1987; SILVA, 2013).

Silva (2013) ainda descreve que a martensita pode assumir morfologias diferentes dependendo do teor de carbono em sua solução, como demonstrado na Figura 11. Em formas de placas em teores mais elevados e menores teores ela irá se apresentar na forma de ripas.

Figura 9 - Diagrama Temperatura X Carbono (%)

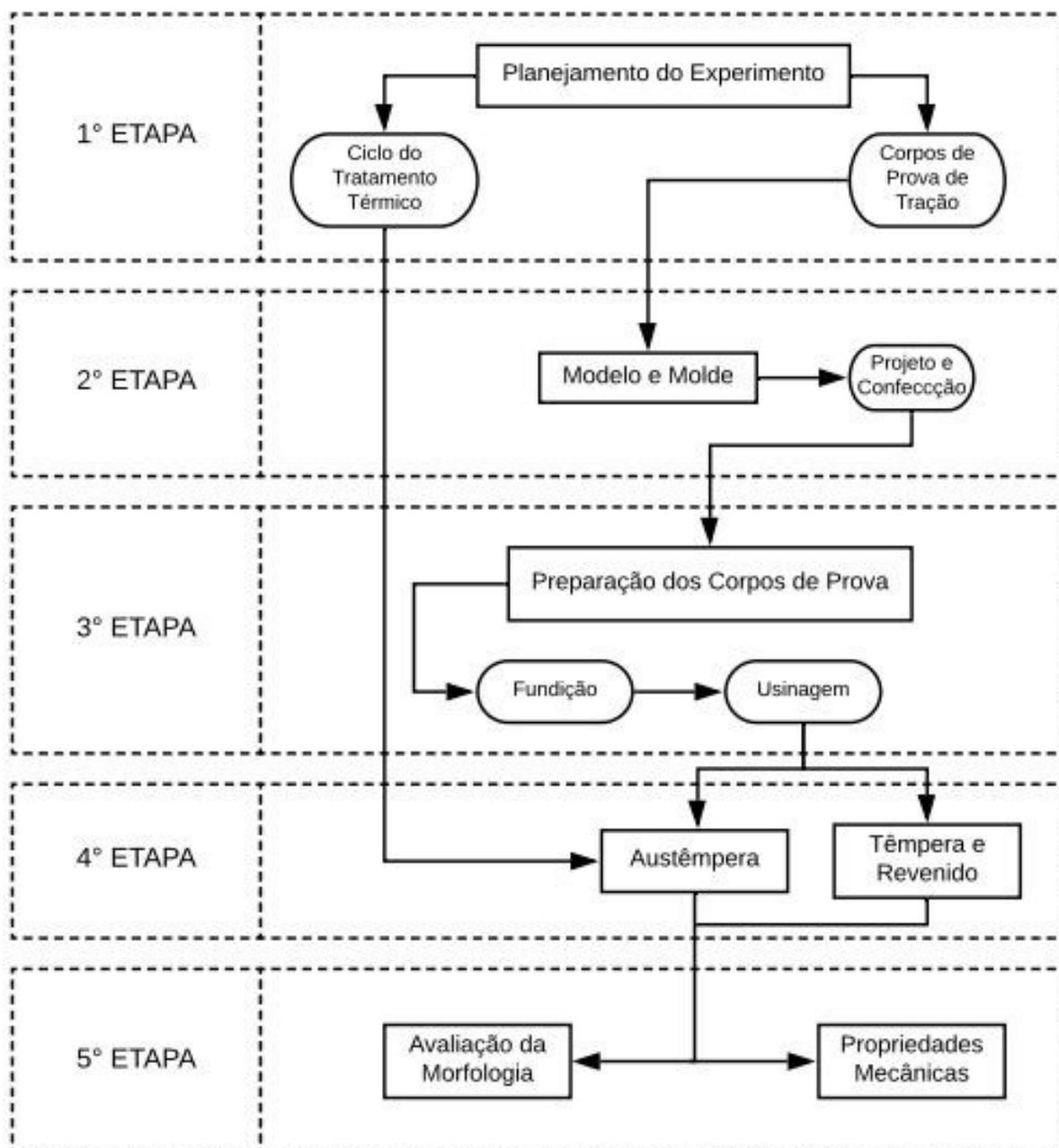


Fonte: Silva (2013)

3.METODOLOGIA (MATERIAIS E MÉTODOS)

Com a finalidade de atingir os objetivos propostos, este trabalho foi estruturado em 5 etapas. O fluxograma da Figura 12 mostra de forma esquemática como a metodologia deste trabalho foi estruturada.

Figura 10 - Fluxograma



Fonte: Autoria própria

3.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

3.1.1 Número de Corpos de prova

Com um número adequado de amostras (corpos de provas), os valores obtidos através de testes são precisos e confiáveis. No caso deste experimento serão utilizadas as seguintes quantias de corpos de prova:

Tabela 4 - Quantidade de corpos de prova necessária.

	Austêmpera	Têmpera	Branco	Total
Nº de Amostras	24	06	03	33

Fonte: Aatoria própria.

Para a austêmpera, foram utilizadas quatro variáveis de temperatura, sendo em cada condição utilizadas três peças, totalizando doze unidades. Para dados concretos e confiáveis, foi realizado réplica desse mesmo ensaio, totalizando 24 peças tratadas.

A têmpera por ser apenas um ensaio de estudo pouco aprofundado, foram feitos dois tratamentos com três peças por vez, em apenas duas temperaturas distintas, sem réplica. E para finalizar, os brancos serão as peças sem tratamento a serem comparadas, sofrendo apenas os ensaios de tração e dureza.

3.1.2 Temperaturas de Tratamento

No estudo apresentado por Franco (2010) as variáveis de temperatura se encontram em 900 °C para a etapa de austenitização com manutenção de 1,5 horas. E posteriormente para o resfriamento a temperatura é de 370 °C por 1,5 horas. O mesmo justificou a escolha da temperatura de resfriamento de 370 °C por ser indicada em diversos trabalhos devido à maior resistência à fadiga que atribui ao material e por proporcionar melhores condições de usinabilidade. Dias (2006) em seu trabalho variou seus parâmetros de temperatura em 300 °C em 1h e 360 °C em 1,5h e 0,6h.

Em Boneti (2014) foi aplicado 295 °C e 365 °C no resfriamento para austêmpera do D-5506, fundido na mesma empresa desse trabalho, FERSUL Manufaturados de Ferro Ltda. O mesmo caso ocorre em Jucumasso (2018) que cita

as temperaturas de 250 e 300 °C. Já em Pimentel e Guessser (2017), as temperaturas de resfriamento são de 270 e 310 °C aplicadas na austêmpera de ferro fundido nodular com adições de nióbio e de cromo.

Considerando a literatura existente, para este trabalho foram utilizadas as temperaturas mostradas na Tabela 5. Inicialmente foi realizado o ensaio de tração em corpos de prova sem tratamento térmico e em seguida realizado o ensaio nos corpos de prova que foram submetidos a diferentes temperaturas de tratamento.

Tabela 5 - Variável de temperatura

Temperatura de Austêmpera
260 °C
300 °C
340 °C
380 °C

Fonte: A autoria própria.

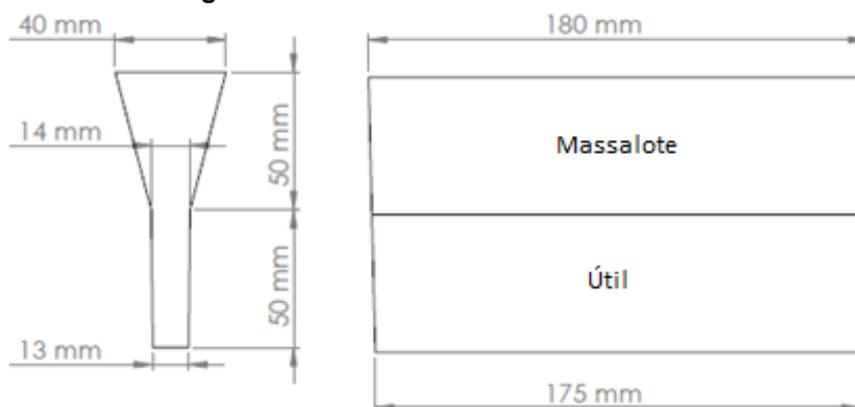
Essas variáveis de temperatura foram escolhidas com intervalos de quarenta graus celsius, localizadas na possível janela de processo citada por Kovacs (1990), que seria de 230 a 400 °C a fim de conseguir caracterizar todas as microestruturas presentes na austêmpera. Como não possuímos o diagrama TTT desse material fundido em específico, baseamos também em Boneti (2014) e Jacumasso (2018), já que os mesmos fizeram estudos do mesmo material D-5506, da mesma empresa de fundição desse trabalho.

3.2 MODELO E MOLDE

3.2.1 Projeto

Para produzir corpos de prova com microestruturas semelhantes entre eles foi utilizado o modelo em Y com espessura de $\frac{1}{2}$ ", segundo a norma ASTM A879M, que define as dimensões do fundido para o ADI como pode ser visto na Figura 13.

Figura 11 - Desenho técnico modelo Y 1/2".



Fonte: Adaptado ASTM A879M.

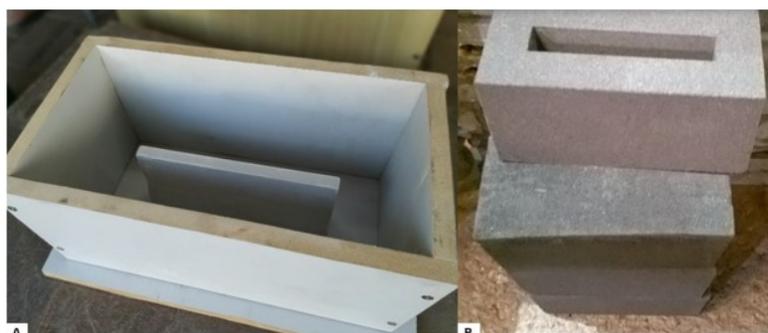
Após definido e desenhado com auxílio do *software* SolidWorks, o modelo foi confeccionado por impressora 3D com filamento de ABS e espessura 1,5 mm. Para a preparação do molde o modelo foi montado em uma placa quadrada de MDF e preparado, uma caixa do mesmo material da placa, com dimensões de 300x300x150 mm com o fundo fixo e sem tampa, mostrado na Figura 14

3.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

3.3.1 Fundição

O modelo e a caixa, foram encaminhados para a empresa Fersul Manufaturados de Ferro Ltda, para a confecção do molde em areia verde. Para atender o número de corpos de prova citado anteriormente, foram preparados 7 moldes, e logo após o tempo de cura, encaminhados para a fila de vazamento do SAE D-5506 (Figura 14).

Figura 12 - a) Modelo e caixa montados; b) Moldes fabricados em areia verde.



Fonte: Autoria própria.

O material fundido foi vazado a uma temperatura aproximada de 1380 °C, com tempo total de vazamento de aproximadamente 30 segundos. Para análise e ajuste da composição do fundido nodular foi retirada medalhas na fase final da fusão. o final do vazamento (Figura 15-a). As análises foram feitas em um equipamento espectrômetro da marca SPECTRO MAX de emissão óptica (Figura 15-b).

Figura 13 - a) Medalha final de vazamento; b) Espectrômetro SPECTRO MAX de emissão óptica.



Fonte: Autoria própria.

Após atingida a composição especificada para o material foi realizado o vazamento nos moldes. A composição final é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição química do SAE D-5506 (% em peso).

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)	Mg (%)	Fe (%)
3,58	2,52	0,24	0,04	0,02	0,47	0,03	92,9

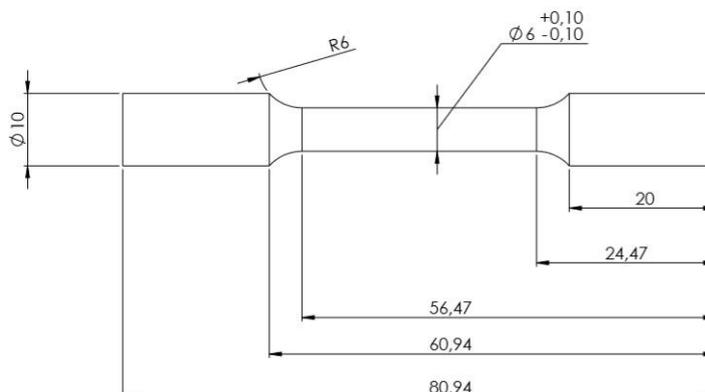
Fonte: FERSUL Manufaturados de Ferro Ltda, 2019

A verificação da qualidade superficial das peças após solidificação ocorreu de forma visual, analisando cada bloco quanto a presença de porosidades e rechupes que afetassem os corpos de prova.

3.3.2 Usinagem

Os corpos de prova de tração foram usinados para atender as dimensões da norma A897/A897M – 06 (2011), de ½”, como representado na Figura 16. A usinagem foi realizada na FF. Usinagem Ltda, em torno CNC, para manter uma uniformidade dimensional em todas as peças.

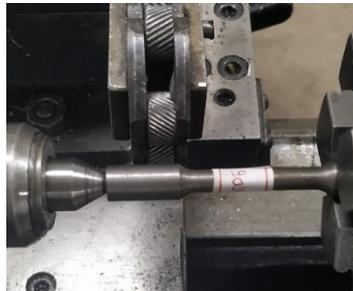
Figura 14 - Corpo de prova de tração



Fonte: Adaptado ASTM A879M.

Além da usinagem em CNC, houve a necessidade de recartilamento (Figura 17), em torno convencional, dos corpos de prova submetidos à austêmpera em temperatura mais baixa, no caso à 260 °C para que não ocorresse escorregamento da pinça da máquina durante o ensaio de tração, devido à alta dureza esperada.

Figura 15 - Processo de recartilamento dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria

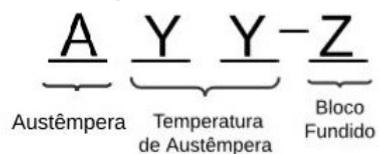
3.4 MAPEAMENTO DOS CORPOS DE PROVA

O mapeamento e marcações dos corpos de prova foram feitos de acordo com as condições do tratamento, número do corpo de prova, temperatura e de qual bloco foi fundido, como está mostrado a seguir:

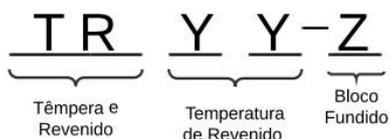
(a) Corpos de prova sem tratamento;

<u>B</u>	<u>Y</u> -	<u>Z</u>
Branco / Sem Tratamento	N° do Corpo de Prova	Bloco Fundido

(b) Corpos de prova da austêmpera;



(c) Corpos de prova da tempera e revenido.

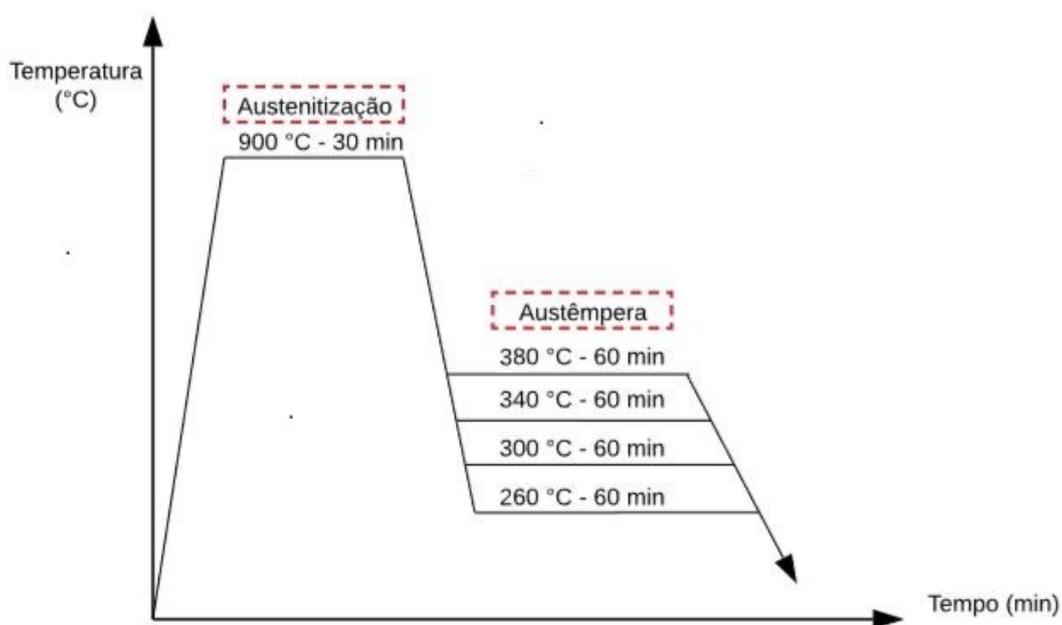


3.5 AUSTÊMPERA

3.5.1 Ciclo térmico

O ciclo de austêmpera foi definido com base nas referências citadas, sendo de 30 minutos para a austenitização a 900 °C, e austêmpera na salmoura em quatro diferentes temperaturas (260, 300, 340 e 380 °C) por 60 minutos cada (Figura 18).

Figura 16 - Ciclo de Austêmpera.



Fonte: Autoria própria

3.5.2 Equipamentos e materiais para Austêmpera

Para o tratamento foi utilizado o Sal AS140 Duferrite, que possui temperatura de fusão igual a 140 °C, em um recipiente conforme mostrado na Figura 19. Este foi idealizado neste tamanho devido possuir limitações de espaço dentro dos fornos muflas, além do mais foi pensado em fazê-lo compacto, a fim de ser utilizado em futuras aulas práticas na disciplina de tratamentos térmicos ofertado na UTFPR.

Figura 17 - Recipiente utilizado para o banho de sal.



Fonte: Autoria própria.

Foram utilizados dois fornos do tipo mufla da marca Jung, Figura 20, do laboratório de tratamento térmico da UTFPR campus Pato Branco. Um para a austempera a 900 °C (figura 20a) e outra para aquecimento do sal (figura 20b). Para controle da temperatura do sal foi utilizado um termopar modelo PT-100 do tipo K inserido no sal enquanto estava no forno e durante o tratamento e um multímetro para leitura da temperatura.

Figura 18 - a) Mufla 2 para austenitização; b) Mufla 1 para o tratamento de austêmpera.



Fonte: Autoria própria.

3.5.3 Cálculo da variação de temperatura do sal

A temperatura de tratamento sofre um acréscimo devido a temperatura mais elevada dos corpos de prova, quando estes entram em contato com o sal fundido, este é um ponto importante do tratamento. Grandes variações de temperatura podem implicar em um tratamento térmico fora dos padrões mostrados bibliograficamente, formando uma microestrutura não esperada e como consequência propriedades mecânicas diferentes.

Para calcular o acréscimo de temperatura, foi utilizada a equação da calorimetria (equação 3 e 4):

$$Q_1 = m_1 \cdot C_1 \cdot T_1 \quad (3)$$

Onde:

m_1 - é a massa do suporte dos cp's somado aos corpos de prova dentro do recipiente

C_1 - é o calor específico do Ferro Fundido Nodular D-5506

T_1 - Diferença da temperatura dos cp's (de austenitização e de austêmpera)

$$Q_1 = m_2 \cdot C_2 \cdot T_2 \quad (4)$$

m_2 - é a massa de sal dentro do recipiente

C_2 - é o calor específico sal AS140 Durferrite

T_2 - Diferença da temperatura no sal.

Dados:

m_1 - 0,16 kg

m_2 - 0,52 kg

C_1 - 420 J/Kg*K

C_2 - Tabela 7

T_2 - Tabela 7

Os dados do calor específico e de variação de energia obtidos pela equação 3 e 4, estão mostrados na tabela 7.

Tabela 7– Dados obtidos

T (°C)	260	300	340	380
C2 (J/kg*K)	1455	1485	1510	1540
Q1 (J)	43008	40320	37632	34944
$\Delta T2$	56,84	52,21	47,93	43,64

Fonte: Autoria própria

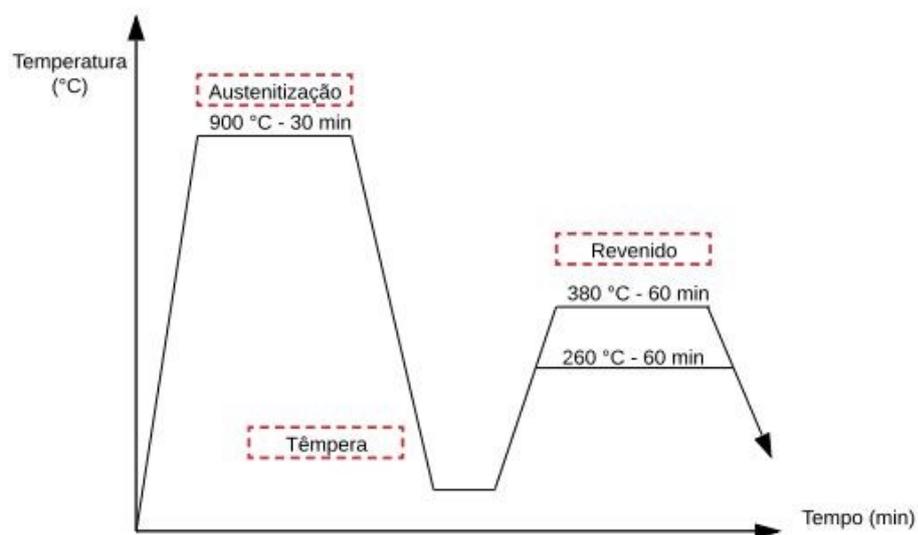
A variação de temperatura de 56,84 °C é esperada para a condição de temperatura de 260 °C neste tratamento.

3.6 TÊMPERA E REVENIDO

A têmpera e revenido no caso deste trabalho de conclusão, servem principalmente para comparar à austêmpera. Logo, as duas temperaturas de revenimento foram realizadas nos extremos do outro tratamento, ou seja, ao ciclo apresentado na imagem abaixo, sendo a austenitização de 30 minutos e a têmpera de uma hora.

Foram utilizados os mesmos equipamentos e materiais apenas alterando o meio da têmpera. Para este processo foi utilizado resfriamento em óleo e o revenido foi feito no mesmo recipiente com o sal da austêmpera.

Figura 19 - Ciclo de Têmpera e Revenido.



Fonte: Autoria própria

3.7 AVALIAÇÃO

3.7.1 Metalografia

A metalografia das amostras foi realizada no Laboratório de Ensaios (H005) da UTFPR - Campus Pato Branco, seguido a Norma ASTM E1920-03, seguindo processos usuais de preparação de amostras como corte embutimento, lixamento e polimento, obtendo o acabamento requerido para o ataque químico. Os materiais e equipamentos utilizados respectivamente foram:

- Policorte Metalográfica, Modelo COR – 40 e Marca Arotec;
- Prensa de embutimento, Modelo PRE – 30S e Marca Arotec;
- Politriz Modelo APL 4 e Marca Arotec. Foram utilizadas lixas com granulometria de 120, 300, 600 e 1200.
- Para o polimento foi utilizado alumina 1 µm em suspensão;
- Ataque químico foi feito com solução Nital 3%.

3.7.2 Morfologia

A morfologia da microestrutura foi caracterizada por Microscopia Óptica (MO), realizada na sala de ensaios mecânicos H005 da UTFPR com o instrumento de registro ótico da marca MEIJI, o qual possui os aumentos de 50, 100, 200 e 400 vezes (Figura 22).

Figura 20 - Microscópio Óptico.



Fonte: Autoria própria.

3.7.3 Ensaio de Dureza

A medida da dureza foi feita em Rockwell C em um durômetro de bancada Digimes, que (Figura 23). O equipamento foi configurado com uma pré-carga de 10 kgf e uma carga de 100 kgf.

Figura 21 - Durômetro Digimes (HRC).



Fonte: Autoria própria

3.7.4 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina Universal de Ensaios com capacidade para 10 Toneladas, disponível no Laboratório de Ensaios (H005), na UTFPR - Câmpus Pato Branco (Figura 24), com uma velocidade de avanço de 5 mm/min para todas as configurações.

Figura 22 - Máquina Universal de Ensaios.



Fonte: Autoria Própria

4.RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 AVALIAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

As etapas de projeto e concepção do modelo para fundição se mostraram muito satisfatórias quando analisado os blocos Y de D-5506 (Figura 25), onde foi notado que as porosidades e rechupes se encontram apenas no massalote do bloco.

Figura 23 - Avaliação visual do bloco Y.



Fonte: Autoria Própria

O processo de usinagem em torno CNC, dos corpos de prova conferiu agilidade e precisão ao trabalho (Figura 26). Após a usinagem foi verificado a existência de porosidades e trincas visíveis na área útil em 03 corpos de prova, além da existência de falhas onde o corpo de prova é fixado na pinça, como mostrado na figura a baixo, estes foram descartados para que não afetassem os resultados, utilizados apenas para testes.

Figura 24 - Corpos de Prova



Fonte: Autoria Própria

4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas avaliadas estão mostradas na Tabela 8. Analisando os valores de dureza podemos verificar que no caso da austêmpera, conforme ocorre o aumento da temperatura de tratamento térmico, a dureza tende a diminuir. O mesmo caso ocorre na têmpera e revenido, porém, em uma escala bem menor.

Valores maiores de resistência mecânica (Tabela 8) junto ao aumento da dureza dos corpos de provas, devido à austêmpera foram confirmados, sendo até maiores que o dobro no caso de 260 °C, caracterizado pela formação de bainita na forma de agulhas de ferrita. Porém o alongamento nesse caso diminui pela metade.

Tabela 8- Dados de alongamento, limite de resistência à tração e dureza.

CP	Alongamento (%)	Tensão (MPa)	Dureza (HRC)
A 26	3,4 ± 1,1	1338 ± 23	43 ±1,0
A 30	5,6 ± 2,3	1097 ± 55	35 ±1,1
A 34	11,1 ± 2,6	1018 ± 32	29 ±1,1
A 38	16,3 ± 3,8	914 ± 20	26 ±1,0
TR 26	1,8 ± 0,8	1024 ± 30	52 ±0,9
TR 38	2,0 ± 0,4	1286 ± 45	49 ±1,2
B	7,9 ± 2,6	592 ± 9	14 ±1,1

Fonte: Autoria própria

Propriedades mais interessantes aparecem conforme a temperatura aumenta. Com uma resistência ainda muito alta, a ductilidade passa a ser maior que o material sem tratamento térmico. No caso de 380 °C o alongamento torna-se muito elevado para um ferro fundido nodular, possibilitando utilidades variadas para o uso de material, que ainda possui uma resistência mecânica e dureza consideradas melhores que a peça branca.

Podemos classificar o ferro fundido austemperado conforme a norma, segundo os resultados obtidos. A classificação está mostrada na Tabela 9.

Tabela 9 - Classificação conforme a norma ASTM A 897 do ADI.

Classes de ferro fundido nodular austemperado (ASTM A 897) *	Temperatura de Austêmpera
850/550/10	380 °C
1050/700/07	300, 340 °C
1400/1100/01	260 °C

Fonte: Autoria própria

4.2 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA

Na imagem da Figura 25 é ilustrada a morfologia obtida por microscopia óptica, retirada da área útil do bloco fundido em Y de ferro fundido nodular, com ataque de Nital a 3%, com aumento de 400 vezes.

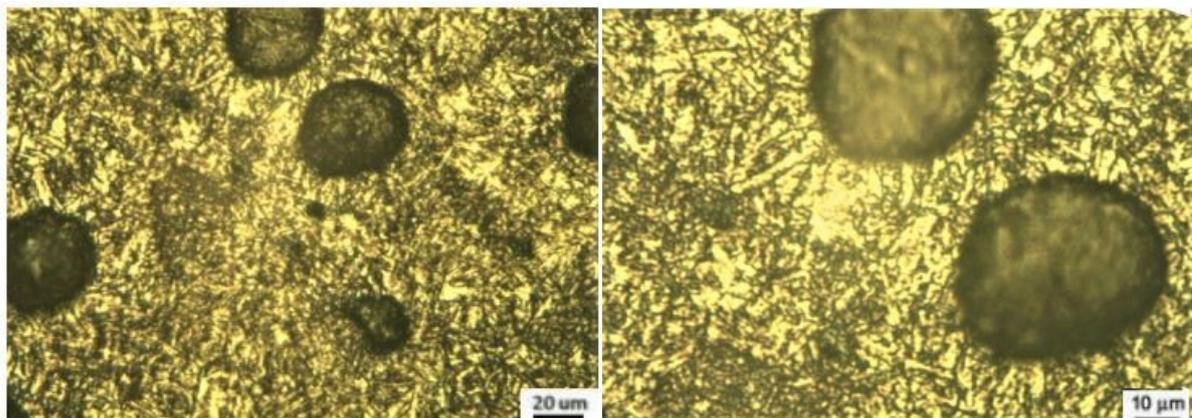
Figura 25 - Ferro fundido nodular bruto, com aumento em 400 vezes – Nital 3%.



Fonte: Autoria própria

Na matriz ferrítica/perlítica (Figura 25) a perlita se caracteriza pela coloração mais escura e em maior quantidade, já a ferrita é observada ao redor do nódulo de grafita com tonalidade clara. É possível analisar que há uma distribuição heterogênea de nódulos de grafita, característica desse material.

Figura 26 - Amostra austenitizada a 900 °C por 30 min e austemperada a 260 °C por 60 min – Nital 3%, (a) com 200x de aumento e (b) com 400x de aumento.



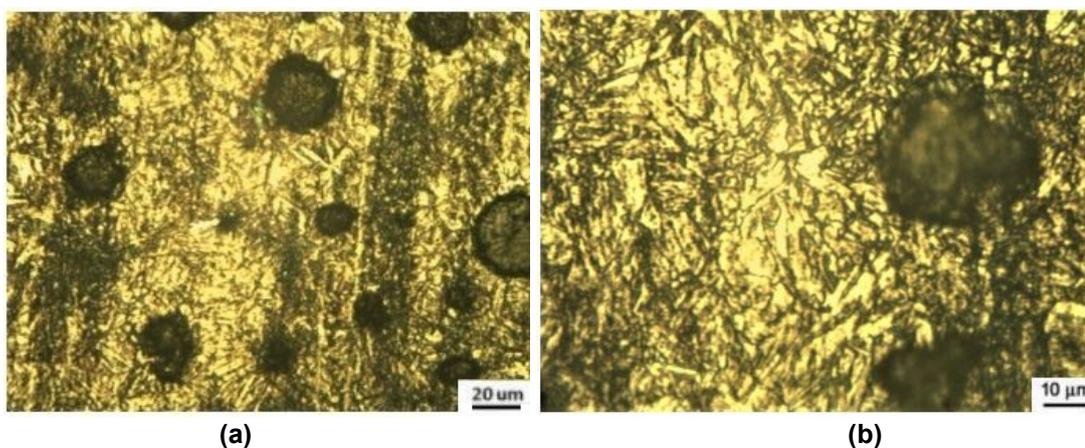
(a)

(b)

Fonte: Autoria própria

Na Figura 26 podemos ver em forma de agulha a formação de ferrita bainítica, e na forma clara a maior parte sendo de austenita retida junto à ferrita. Conforme a bibliografia, nesse caso a forma de bainita inferior deveria estar presente. Porém, devido variação de temperatura, pode ter sido a grande causa da mudança de microestrutura. Ainda possuindo altas propriedades o material se assemelhou ao caso de uma austêmpera próxima a 300 °C.

Figura 27 - Amostra austenitizada a 900 °C por 30 min e austemperada a 300 °C por 60 min – Nital 3%, (a) com 200x de aumento e (b) com 400x de aumento.



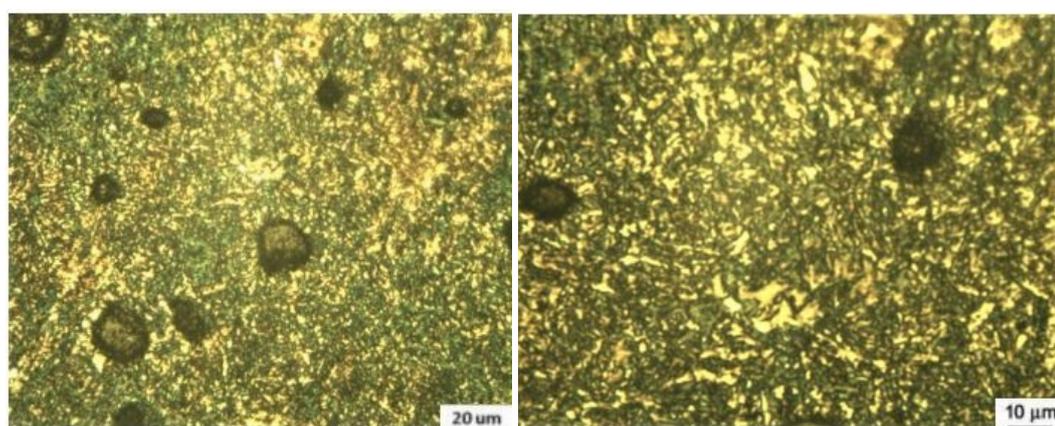
(a)

Fonte: Autoria própria

(b)

Para a austêmpera em 300 °C a forma estrutural é apresentada na Figura 27. A parte clara é possivelmente austenita retida, e feixes de ferrita na forma de agulhas mais grosseiras (mais escuras), além dos nódulos de grafita. Esta estrutura condiz com a dureza mais baixa que a apresentada anteriormente.

Figura 28 - Amostra austenitizada a 900 °C por 30 min e austemperada a 340 °C por 60 min – Nital 3%, (a) com 200x de aumento e (b) com 400x de aumento.



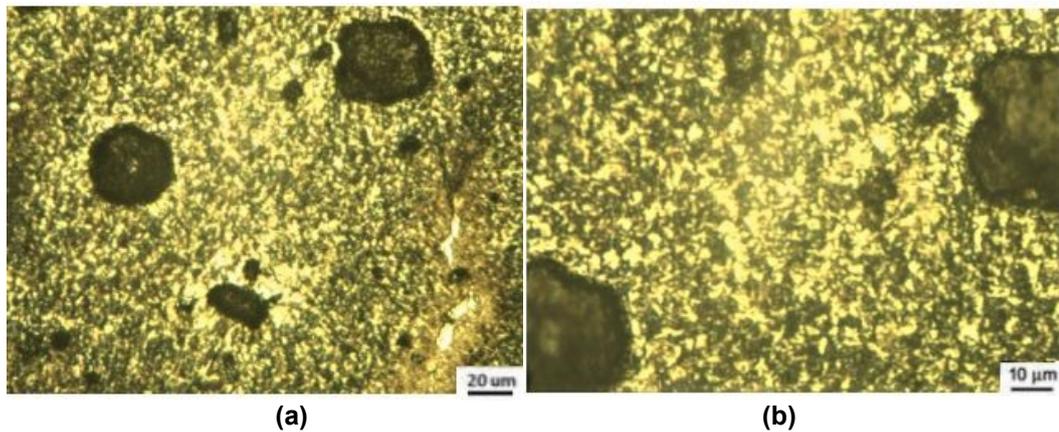
(a)

Fonte: Autoria própria

(b)

Na temperatura de 340 °C a austenita retida aparece de uma forma muito mais discreta em formas de placa (Figura 28). A ferrita bainítica que antes aparecia em temperaturas mais baixas, agora já se transformou em apenas ferrita em uma proporção muito maior. Este é um caso para ser investigado, pois a possibilidade de um elemento de liga, nesse caso, o cobre, pode ter tido uma grande influência nessa transformação. Para o caso de a microestrutura mais clara ser menor em quantidade do que na temperatura anterior, podemos propor, considerando à grande redução de dureza, que a ferrita ficou mais evidente saindo da austenita retida, mudando o estágio de transformação.

Figura 29 - Amostra austenitizada a 900°C por 30 min e austemperada a 380 °C por 60 min – Nital 3%, (a) com 200x de aumento e (b) com 400x de aumento.

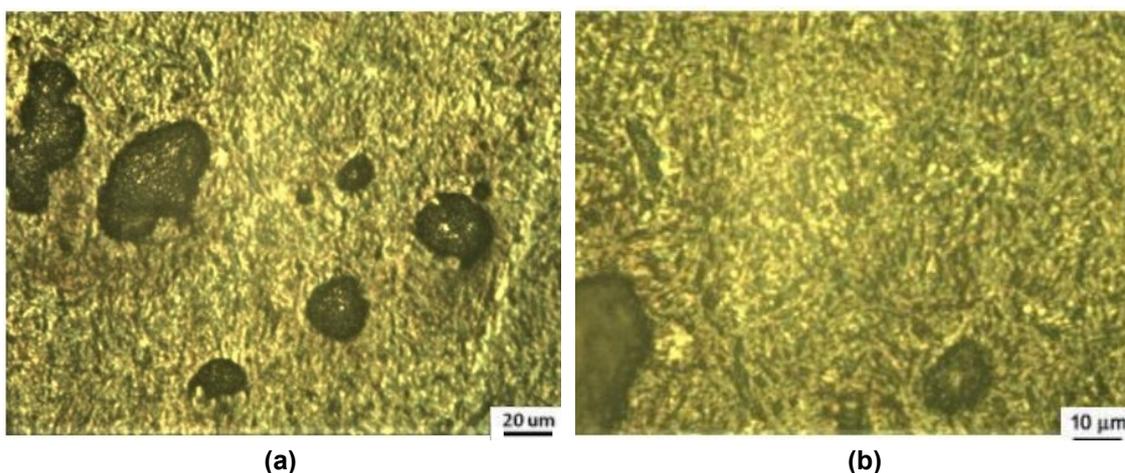


Fonte: Autoria própria

Através da metalografia da austêmpera vista na Figura 29, diverge da apresentada na revisão bibliográfica. O principal motivo dessa causa pode ser porque o tratamento saiu da 'janela de processo', o que pode ter permitido uma austêmpera acima dos 400 °C. Devido a diferença de temperatura, como demonstrada na Tabela 7 ser elevada, resultado este causado pelo recipiente ser pequeno, ocorreu a formação de ferrita e carbonetos em sua matriz podendo ser notados no canto inferior direito na figura 29a com 200x. A dureza de 26 HRC, um valor alto para esse caso, indica que pode ter tido a ocorrência de carbonetos na estrutura, algo que faria essa estrutura tornar o material frágil ao impacto. No entanto, para a comprovação da fragilidade seria necessário efetuar um ensaio de impacto.

Como Silva (2013) comenta em seu estudo, mesmo não sabendo a porcentagem de carbono, a metalografia desta amostra apresenta forma mista entre ripas e placas de martensita (Figura 30).

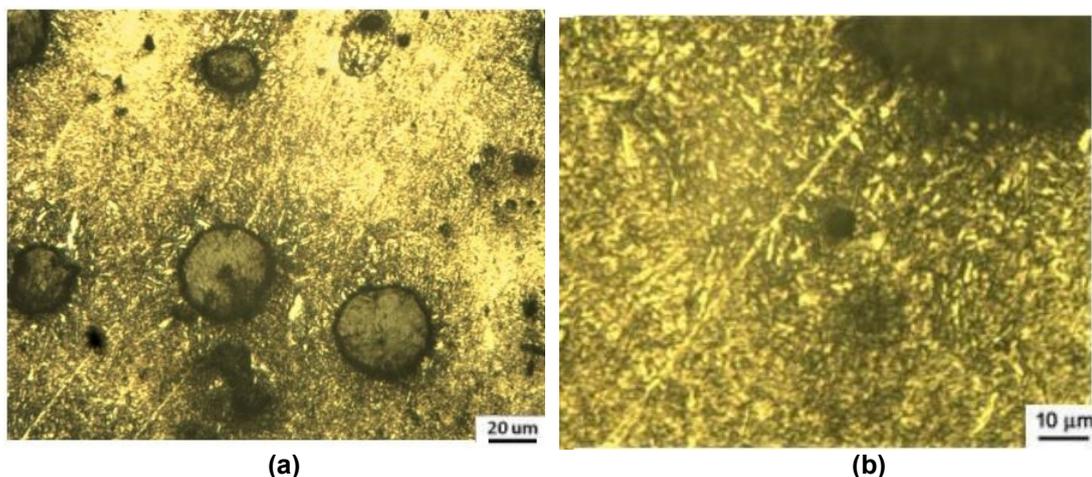
Figura 30 - Amostra austenitizada a 900 °C por 30 min, temperada e revenida a 260 °C por 60 min – Nital 3%, (a) com 200x de aumento e (b) com 400x de aumento.



Fonte: Autoria própria

Na Figura 31, com a temperatura de revenimento sendo de 380 °C, podemos notar lâminas claras. Algo inesperado, mas com grande chance de se tratar de austenita retida em meio a placas de martensita, possivelmente causada pela ação de algum elemento de liga. Na Figura 31a com 200x também podemos notar a formação de carbonetos caracterizados pela cor branca, sendo os maiores causadores de fragilidade, tornando a ductilidade muito baixa.

Figura 31 - Amostra austenitizada a 900 °C por 30 min, temperada e revenida a 380 °C por 60 min – Nital 3%, (a) com 200x de aumento e (b) com 400x de aumento.



Fonte: Autoria própria

Nos dois casos da têmpera e revenido podemos encontrar propriedades muito semelhantes. Isso acontece devido a temperatura de revenimento ser muito baixa para surtir efeito na microestrutura desse material. A dureza mais baixa na temperatura de 380 °C ocorreu devido a maior quantidade de martensita revenida. Porém podemos verificar pela análise da resistência mecânica, que houve fragilização do material nesta temperatura estudada.

5. CONCLUSÕES

Com o objetivo de determinar as propriedades mecânicas e a microestrutura do ferro fundido SAE D-5506 submetido a diferentes ciclos de austêmpera e têmpera e revenido destacam-se as seguintes conclusões:

No tratamento térmico de austêmpera, as propriedades adquiridas pelos ensaios se encontram dentro da bibliografia. Apresentando maiores valores de dureza e resistência em temperaturas de tratamento mais baixas, e conseqüentemente um menor valor de alongamento. Apesar do tratamento em 380°C, mostrar sua morfologia fora da janela de processo, suas propriedades podem se tornar usuais em aplicações da engenharia, principalmente por possuir um alongamento tão grande, porém testes novos devem ser realizados para analisar se os carbonetos encontrados não fragilizam a estrutura do material.

A têmpera e revenido demonstraram propriedades relevantes, porém se comparadas à mesma aplicação que os componentes austemperados são expostos, o baixo alongamento devido a fragilidade limita sua aplicação. Talvez com diferentes temperaturas de revenimento suas propriedades poderiam se equivaler à austêmpera, mas nesse caso fugiria da metodologia imposta neste trabalho.

Sugestões para futuros trabalhos seriam por exemplo; i) ampliação da faixa de temperatura de tratamento e a influência do tempo de tratamento; ii) estudo da influência da temperatura de austenitização para o tratamento do D-5506, iii) caracterizar o material através do ensaio de impacto, para avaliar a resiliência do material, iv) realizar o estudo desse material submetido à fadiga. Pontos esses, que iriam ainda mais retratar o material e enriquecer a bibliografia atual.

REFERÊNCIAS

ASTM International: **ASTM A247-16a - Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings**, 2016.

ASTM International: **ASTM A897/A897M-06 - Standard Specification for Austempered Ductile Iron Castings**, 2011.

BDG, **Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie. Gusseisen mit Kugelgraphit (Herstellung – Eigenschaften – Anwendung)**. 2007. Disponível em: <https://www.bdguss.de>. Acesso: 20 mar, 2019.

BONETI, Ludiere Lucas Toldo. **Influência Das Temperaturas De Austenitização E Austêmpera Na Microestrutura E Propriedades De Tração De Um Ferro Fundido Nodular**. UEPG, Ponta Grossa/PR, 2014.

CARMO, Denilson José. **Desenvolvimento do processo tecnológico de fabricação de peças em ferro fundido nodular austemperado (ADI)**. UFMG, Belo Horizonte/MG, 2003.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. São Paulo, SP: ABM, 1996 599 p.

CHIAVERINI, Vicente. **Associação Brasileira De Metais. Tratamentos térmicos das ligas ferrosas**. 2. ed. São Paulo: ABM, 1987 232 p.

CAMPIGOTTO, Gabriel Müller. **Comportamento Microestrutural E Mecânico De Ferro Fundido Nodular Ao Ni+Cu, Quando Submetido A Diferentes Condições De Austêmpera E Têmpera E Partição**. UFSC, Joinville/SC, 2018.

DIAS, José Felipe. **Estudo Do Comportamento À Fadiga Em Ferro Fundido Nodular Austemperado (Adi) Sujeito A Carregamento De Amplitude Variável**. Belo Horizonte/MG, 2006.

D.Wilk-kołodziejczyk, A.S.Kluska-nawarecka., K.Regulski, W.Adrian e K.Jaśkowiec. **Austempered Ductile Iron Manufacturing Data Acquisition Process With The Use Of Semantic Techniques**. 2016.

FERREIRA VIDAL, Douglas. **Análise De Estrutura E Propriedades Mecânicas De Um Ferro Fundido Nodular Em Processo De Fundição Produzido Pela Técnica De Imersão De Sino**. Campos dos Goytacazes/RJ, 2013.

FRANCO, Francis José Saldanha. **Influência da deformação superficial induzida na resistência à fadiga do ferro fundido nodular austemperado**. UFMG, Belo Horizonte/MG, 2010.

GUESSER, Wilson Luiz. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos**. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

HARDING, R.A. **The production, properties and automotive applications of austempered ductile iron**. The University of Birmingham/UK, 2007.

JACUMASSO, Tiago. **Influência Dos Parâmetros De Austêmpera Em Ferro Fundido Nodular: Microestrutura, Propriedades Mecânicas E Aspectos Da Geometria Fractal Na Fratura**. UEPG, Ponta Grossa/PR, 2018.

KIOSKEA. Diagrama de Gantt. **Kioskea.net**, 2011. Disponível em: <<http://pt.kioskea.net/contents/projet/gantt.php3>>. Acesso em: 07 Mar. 2011.

KEOUGH, J. R. **Ductile Iron Data For Design Engineers**. Ductile Iron Society, 1998. Disponível em: <https://www.ductile.org/didata/Section4/4intro.htm#Austempering>. Acesso em: 26 mar, 2019.

KOVACS. Bela V. **Austempered Ductile Iron: Fact and Fiction**. AFC Technical Center Livonia,MI. 1990.

MACHADO, Marco Antônio. **Desenvolvimento Dos Parâmetros De Tratamento Térmico De Um Ferro Fundido Nodular Austemperado Astm 987 Grau**. UFRGS, 2007.

MAGALHÃES, Elton Franco. **Caracterização e Proposição de Métodos Estimativos das Propriedades Monotônicas e Cíclicas dos Ferros Fundidos Nodulares**. São Carlos/SP, 2011.

MAXFER, Metais. **Ferro Fundido Nodular**. 2017. Disponível em: www.maxfer.com.br/ferro-fundido-nodular. Acesso em: 24 abr. 2019

PIMENTEL, Amanda Souza Oliveira, GUESSER, Wilson Luiz. **Tratamento térmico de austêmpera em ferro fundido nodular com adições de nióbio e de cromo**. Revista Matéria, Joinville/SC, 2017.

PUTATUNDA, Susil K. **Comparison of the Mechanical Properties of Austempered Ductile Cast Iron (ADI) Processed by Conventional and Step-Down**

Austempering Process, Materials and Manufacturing Processes, 25:8, 749-757.EUA, Detroit, Michigan, 2010.

RODRIGUES Jr, Aauri Silveira. **Avaliação Do Ferro Fundido Nodular Austemperado Aplicado a Facas Industriais para Trabalho a Frio.** UniFOA, Volta Redonda/RJ, 2013.

ROSARIO, Adriano Murilo. **Estudo Dos Efeitos De Elementos De Liga Na Solidificação De Um Ferro Fundido Cinzento Via Análise Térmica 2012.** 175 f. UEPG, Ponta Grossa/PR, 2012.

SILVA, Anderson José Saretta Tomaz da et al. **Quenching and partitioning heat treatment in ductile cast irons.** Mat. Res., São Carlos/SP, 2014.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS – SAE. **SAE J434: Automotive Ductile (Nodular) Iron Castings,** Rev 2004.

THOMSON R.C, JAMES J.S. e PUTMAN D.C. **Modelling microstructural evolution and mechanical properties of austempered ductile iron,** Materials Science and Technology, 16:11-12, 1412-1419.UK, 2000.

TRUDEL A. e GAGNÉ M. **Effect of Composition and Heat Treatment Parameters on the Characteristics of Austempered Ductile Irons.** Canadian Metallurgical Quarterly, 36:5, 289-298. Canadá, 2013.

VINAYAK. S. Dakre. **Characterization of Austempered Ferritic Ductile Iron.** IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 346. 2018.