

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

“AVALIAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA EM FERRO FUNDIDO NODULAR  
AUSTEMPERADO CLASSE 65-45-12”

Trabalho de diplomação

Autor: Vinicius de Freitas Paz

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Porto Alegre

2010

## INDICE DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades mecânicas do ADI, segundo a classificação ASTM 897/A.....	8
Tabela 2: Faixa de tolerância da composição química para os ADI's. ....	8
Tabela 3: Composição química da liga, comparativo entre resultados e recomendado por Norma.....	22
Tabela 4: Resultados obtidos no ensaio de dureza Brinell (HB).....	25
Tabela 5: Resistência mecânica estimada a partir do valor de dureza Brinell. (Callister,1994). ....	26

Dedico este trabalho aos meus pais e família, pelo apoio incondicional nas horas mais difíceis e, que fizeram perseguir o objetivo até o presente momento.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a minha família, meus pais e irmãos, que sempre participaram dos momentos mais difíceis e alegres, durante esta longa caminhada. Agradeço ao apoio incondicional da minha noiva Lisiane, por ter mostrado que tudo era possível no fim desta jornada.

Ao Mestrando Eng. Claudio Almirón do Proeng/Lamef pelo apoio técnico nos ensaios junto ao Laboratório. Ao Engenheiro Msc. Marco Antônio Machado da empresa Ferrabraz/Becker pelo apoio na confecção do material de trabalho e oportunidade do mesmo. Ao Msc. Eng. Jorge Braz pela colaboração no trabalho, junto ao tratamento térmico. Agradeço ao LAMEF, aos Professores Afonso Reguly e Telmo Strohaecker pelo apoio acadêmico dado para que o trabalho pudesse ser desenvolvido.

Finalmente a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela oportunidade de poder estudar em uma das melhores universidades públicas e gratuitas do nosso País.

## INDICE

LISTA DE SÍMBOLOS .....	2
ÍNDICE DE FIGURAS .....	3
RESUMO .....	6
ABSTRACT .....	7
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
2.1 CLASSES DE FERROS FUNDIDOS COMERCIAIS .....	3
2.2 FERRO FUNDIDO NODULAR AUSTEMPERADO-ADI .....	4
2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS FERROS FUNDIDOS NODULARES AUSTEMPERADOS:.....	7
2.4 SOLIDIFICAÇÃO DOS FERROS FUNDIDOS NODULARES .....	9
2.5 TRATAMENTO TÉRMICO DE AUSTÊMPERA NOS FERROS FUNDIDOS NODULARES.....	10
2.6 ASPECTOS SOBRE MECÂNICA DA FRATURA EM MATERIAIS METÁLICOS.....	11
2.6.1 Modos de carregamento pela MFLE.....	12
2.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE RESISTÊNCIA À FRATURA EM FERROS FUNDIDOS NODULARES:.....	14
<b>3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>18</b>
3.1 CONFECÇÃO DA LIGA DE TRABALHO E CORPOS DE PROVA .....	18
3.2 TRATAMENTO TÉRMICO APLICADO AOS CORPOS DE PROVA: .....	19
3.3 ENSAIOS DE TENACIDADE À FRATURA.....	20
3.4 CARACTERIZAÇÃO METALÚRGICA .....	21
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>22</b>
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>31</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>32</b>
<b>7. TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>34</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Conceito	Unidade
A	Medida da pré-trinca	
W	Altura do corpo de prova	[mm]
B	Espessura do corpo de prova	[mm]
Y	Coefficiente de Poisson	
$v_p$	Componente plástica da abertura da trinca	
Z	altura dos suportes do extensômetro	[mm]
K	valor do fator de intensidade de tensões	MPa.m <sup>0,5</sup>
Y	Fator de Forma	

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Componentes automotivos fabricados em ferro fundido, à esquerda bloco de motor fabricado em ferro fundido cinzento e a direita distribuição em ferro fundido nodular. [www.tupy.com.br].....	4
Figura 2: Componentes fabricados em ADI de aplicações automotivas.[John R. Keough and Kathy L. Hayrynen- Propriedades do ferro fundido nodular austemperado 2002] .....	5
Figura 3: Relação entre resistência mecânica e redução de peso para o ADI comparativo a diversos materiais. [Hayrynen 2002] .....	6
Figura 4: Diagrama Fe-C de solidificação para os ferros fundidos. .[Colpaert H. ,1959]. .....	9
Figura 5: Austenita de alto carbono e ferrita acicular - caracterizando a ausferrita. [Colpaert 4° Ed.2008] .....	10
Figura 6: Ciclo de tratamento térmico projetado para austêmpera em ferros fundidos nodular.[ Hupalo M. F -2006] .....	11
Figura 7: Modos de carregamento possíveis em uma trinca.[Stroaecker. T.R Mecânica da fratura 2000].....	12
Figura 8:Ampliação da pré-trinca de fadiga no corpo de prova e,em detalhe a fixação dos extensômetros de medição da abertura da trinca no ensaio.[Stroaecker, 1999]. .....	14
Figura 9: Efeito da forma da grafita sobre a tenacidade à fratura (Integral J) para diversos ferros fundidos com matriz ferrítica.(Guesser 2009) .....	15
Figura 10: Influência da temperatura na resistência a tenacidade(J), em função do tamanho de nódulos de grafita [Guesser 2009] .....	15
Figura 11: Abertura crítica da trinca em função da temperatura, para ferros fundidos com diferentes teores de carbono(%) e número de nódulos(nód/mm <sup>2</sup> ).[Guesser 2009] .....	16

Figura 12: Influencia do Si e P na resistência a fratura (J) para ferros fundidos nodulares ferríticos.[Guesser 2009].....	16
Figura 13: Influência da % de austenita na resistência a tenacidade em ferro fundidos nodulares ligados, tratados termicamente.[Guesser 2009].....	17
Figura 14: Moldagem do bloco para fusão da liga e bloco fundido em nodular 65-45-12. ...	18
Figura 15: dimensões do corpo de prova para ensaio de tenacidade tipo CT, segundo norma ASTM E 399-90.....	19
Figura 16: Corpos de prova tratados termicamente. ....	20
Figura 17: Máquina universal de ensaio de fadiga com dispositivo de fixação de ensaio em detalhe. ....	21
Figura 18: Microestrutura da liga bruta de fusão 65-45-12, após o processo de fundição e areia verde. Microestrutura formada por perlita e ferrita. ....	23
Figura 19: Microestrutura do corpo de prova AT1-1 formada por austenita de alto carbono e ferrita após a austêmpera a 280°C. No detalhe, a microestrutura de ausferrita em 1000x. ....	23
Figura 20: Microestrutura do corpo de prova AT2-2 formada por austenita de alto carbono e ferrita após a austêmpera a 300°C.....	24
Figura 21: Microestrutura do corpo de prova AT3-1 após tratamento térmico a 320°C. Pode-se verificar que o tratamento térmico não foi eficaz nesta temperatura.....	25
Figura 22: Gráfico resultante do corpo de prova AT1-1 mostrando o nível de tensões aplicado em Newton versus deslocamento no Clip Gauge. ....	26
Figura 23: Gráfico resultante do corpo de prova AT2-3 mostrando o nível de tensões aplicado versus deslocamento no Clip Gauge.....	27
Figura 24: Gráfico resultante do corpo de prova AT 3-3 mostrando o nível de tensões aplicado versus deslocamento no Clip Gauge.....	27

Figura 25: Fratura do corpo de prova CTOD –AT1 austemperado, 67x de aumento mostrando a região do entalhe(a), região da pré-trinca de fadiga com maior deformação na região superior(b) e a região de propagação catastrófica da trinca(c) .....29

Figura 26: Fratura do corpo de prova CTOD –AT2 austemperado, 67x de aumento, mostrando a região do entalhe(a), região da pré-trinca de fadiga com deformação na parte superior (b) e a região de propagação catastrófica da trinca(c) .....29

Figura 27: Fratura do corpo de prova CTOD –AT3-2 austemperado, 67x de aumento, mostrando a região do entalhe(a), região da pré-trinca de fadiga(b) e a região de propagação catastrófica da trinca(c).....30

Figura 28: Imagem da fratura do corpo de prova CTOD AT3-3 67x de aumento. Inclusões de areia oriundas do processo de fundição estão contidas na estrutura do material. ....30

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de três condições de austêmpera para uma liga de ferro fundido nodular 65-45-12 austêmpera, em relação à tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ), correlacionando às propriedades mecânicas e metalúrgicas obtidas em cada condição de tratamento térmico ensaiadas. Para tanto, foi necessário a confecção de corpos de prova em geometria Y de 18 mm em ferro fundido nodular classe 65-45-12 ferrítico-perlítico, através do processo de fundição em areia verde.

Após a fusão, realizou-se a usinagem de corpos de prova em máquina fresadora e o tratamento térmico de austêmpera em três temperaturas 280 °C, 300°C e 320° C em forno contínuo, para a execução dos ensaios de tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) e caracterização das propriedades mecânicas e metalúrgicas obtidas após os tratamentos térmicos.

Ao final, pode-se avaliar a resistência à tenacidade para cada temperatura ensaiada em tratamento térmico, assim correlacionar o valor de  $K_{IC}$  com as propriedades metalúrgicas obtidas em cada tratamento térmico.

**Palavras-chave:** Tenacidade, austêmpera, ferro fundido nodular, propriedades mecânicas.

## ABSTRACT

The main goal of this paper was to analyze the perform of tree austempered conditions in a ductile iron class 65-45-12 alloy, connecting it the toughness resistance ( $K_{IC}$ ) and mechanical and metallurgic properties, obtained on the step condition the tested heat treatment.

However, it was necessary to foundry the blocks sample Y (thickness 18 mm), on metal ductile iron class 65-45-12 ferritic – pearlitic .

After the foundry, the sample machining, it was developed a test of austempered heat treatment in three temperatures: 280°C, 300°C e 320°C in continuous fournaçe, for making tests the toughness fracture and characterization mechanical and metallurgic properties obtained after the heat treatments.

At the end, it was also possible to evaluate the tenacity strength of each temperature, as well as to point the value resistance  $K_{IC}$  with the metallurgic properties obtained with tested step treatment.

**Key-words:** Toughness, austempered, ductile iron, mechanical properties.

## 1. INTRODUÇÃO

A análise da tenacidade à fratura em ferros fundidos nodulares austemperados, é um assunto recente em projetos de peças fabricadas em ferro fundido, nem tanto abrangente quanto em outros materiais como aço, mas não menos importante.

O ferro fundido nodular austemperado é uma liga com recente histórico no mundo. Há registros que seu desenvolvimento tenha começado por volta de 1950 pelo BCRA (British Cast Iron Research Association) e INCO (International Nickel Company). A partir da década de 1960, surgiram as primeiras pesquisas publicadas e, por volta de 1970 através de pesquisas iniciadas pela General Motors americana e pelo pesquisador Johansson na Finlândia, começaram a expandir o desenvolvimento do ferro fundido nodular austemperado no mundo.

A partir da década de 80, o ADI (Austempered Ductile Iron) passa a ter mais destaque em congressos e simpósios sobre o assunto, tendo desde então maior atenção em diversas aplicações pela indústria automotiva metal-mecânica. Atualmente, o ferro fundido nodular ADI, é utilizado no Brasil por algumas empresas do setor metal-mecânico como a Fundição Tupy e Schultz na confecção de componentes como compressores, bielas, virabrequins, eixos de comando, suportes de fixação para caminhões, ganchos, engrenagens, componentes de fixação e peças do ramo agrícola.

Tanto componentes mecânicos quanto automotivos estão expostos a esforços tanto estáticos quanto dinâmicos e, o comportamento desses componentes frente aos esforços solicitados permite relacionar microestrutura e propriedades mecânicas. A maior parte dos componentes são freqüentemente submetidos a carregamentos repetitivos, sendo a maioria solicitações dinâmicas. [Guessser, 2009]

A análise da tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) em uma liga metálica fornece condições de avaliar a resistência à propagação da trinca em um determinado componente ou dispositivo, estimar o nível de defeitos críticos e utilizar estas informações em projeto de componentes ou dispositivos.

O desenvolvimento do trabalho tem como motivação o recente desenvolvimento do ferro fundido nodular austemperado no mundo e, sua projeção de substituir aços fundidos e forjados em componentes metal-mecânicos.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento à resistência a fratura, de uma liga ferro fundido nodular 65-45-12 austemperada em três temperaturas isotérmicas, caracterizando o desempenho de cada tratamento térmico de austêmpera aplicado à liga, através de ensaios de  $K_{IC}$ , analisando a influência de cada temperatura na resistência à fratura da liga de ferro fundido nodular austemperada.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Classes de Ferros Fundidos Comerciais

Os ferros fundidos são ligas geralmente terciárias com Fe-C-Si predominante na sua composição química, podendo conter outros elementos de liga como Mn, Cr, Cu, S e P. Nestas ligas o carbono apresenta-se de 2,11% até teores mais elevados como 6,7%. Apresentam normalmente solidificação pró-eutética formando austenita e grafita a partir do líquido.

Dentre os ferros fundidos, existem seis classes comercialmente utilizadas: Ferro fundido cinzento, ferro fundido nodular, ferro fundido de grafita compacta (vermicular), ferro fundido mesclado, ferro fundido branco e ferro fundido maleável [Chiaverini 1980]. Cada tipo de ferro fundido apresenta uma morfologia da grafita na matriz, de acordo com seu processo de fabricação, sua composição química e taxa de resfriamento na solidificação.

A maioria dos ferros fundidos tem uma matriz similar a dos aços acrescentando a grafita a sua matriz. Com exceção dos ferros fundidos brancos, que apresentam carbono na forma combinada (Fe<sub>3</sub>C)-Cementita, na sua matriz [Colpaert-1959].

Nos ferros fundidos cinzentos, a grafita tem forma de lamelas na matriz, fornecendo alta capacidade de absorção de vibrações. Já os ferros fundidos nodulares apresentam matriz formada por grafita na forma de nódulos, fornecendo excelente ductilidade, resistência mecânica e tenacidade.

Os ferros fundidos de grafita compacta apresentam grafita na forma vermicular, uma forma situada entre a grafita do ferro fundido cinzento e os nódulos do ferro fundido nodular. Possui propriedades intermediárias entre o ferro fundido cinzento e nodular, apresentando ótimas

propriedades de ductilidade, resistência mecânica e elevada condutividade térmica. Recentemente é utilizado na fabricação de blocos de motores exportados pela fundição Tupy.

Já os ferros fundidos brancos apresentam cementita combinada em uma matriz perlítica ou ferrítica. Geralmente, devido a sua composição química e resistência mecânica é utilizados em situações que requerem resistência ao desgaste do componente, como em estruturas de máquinas jateadoras e discos de freio.

Os ferros maleáveis são obtidos por tratamento térmico a partir de ferros fundidos, possibilitando um núcleo dúctil e uma superfície resistente na peça final.

Em geral os ferros fundidos são utilizados em diversas aplicações metal-mecânicas, como blocos de motores, cabeçotes e coletores de exaustão, como discriminado na figura 01.



**Figura 1: Componentes automotivos fabricados em ferro fundido, à esquerda bloco de motor fabricado em ferro fundido cinzento e a direita, coletor automotivo em ferro fundido nodular. [www.tupy.com.br]**

## 2.2 Ferro Fundido Nodular Austemperado-ADI

O ferro fundido nodular é conhecido por sua ductilidade, apresentando alto módulo de elasticidade e resistência mecânica, em combinação com resistência a corrosão, boa fundibilidade e usinabilidade. Esse material apresenta uma microestrutura típica caracterizada por nódulos em lugar

dos veios de grafita, obtidos pela adição de magnésio e /ou cério enquanto o material encontra-se líquido. [Colpaert, 1959]

À medida que a liga se resfria, os nódulos crescem pela adição do carbono rejeitado pela austenita. A liga resultante é denominada ferro nodular ou ferro fundido dúctil. De acordo com a velocidade de resfriamento e composição química, a matriz que circunda as partículas ou nódulos pode ser formada por perlita ou ferrita. O ferro fundido nodular pode ser predominantemente ferrítico, perlítico ou martensítico, e possui características mecânicas que se aproximam de um aço-carbono baixa liga.

O ADI (Austempered Ductile Iron) em inglês, é a sigla correspondente a classe de ferros fundidos nodulares austemperados. Seu desenvolvimento é recente, entretanto suas elevadas propriedades mecânicas como tenacidade, ductilidade, resistência à tração, resistência a fadiga, possibilitam a sua utilização em diversas aplicações tanto automotivas quanto industriais.

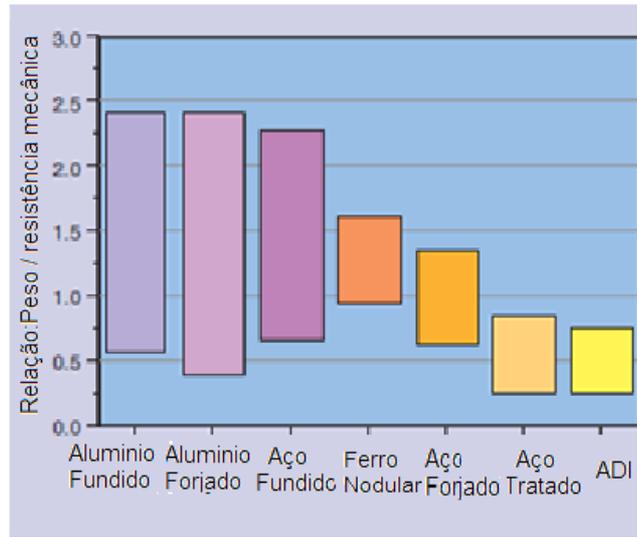
O ADI é atualmente utilizado em diversas aplicações automotivas, como exemplificadas na figura 2, como braços de suspensão, engrenagens, virabrequins, bielas, eixo de comando, ganchos, dispositivos de corte e dispositivos agrícolas.



**Figura 2: Componentes fabricados em ADI de aplicações automotivas [John R. Keough and Kathy L. Hayrynen- Propriedades do ferro fundido nodular austemperado 2002].**

Devido a sua ótima relação entre resistência mecânica e peso em projeto, e tenacidade, lhe conferindo boa resistência à fadiga, o ADI pode ser utilizado em substituição a aços forjados, fundidos, em conjuntos soldados ou fundidos com uma ótima redução de peso e custos. Pode substituir ligas de alumínio, em componentes automotivos por exemplo, devido a sua relação de

resistência mecânica e redução de peso, como mostrado na figura 3. Sua densidade é 10% menor em relação ao aço.



**Figura 3: Relação entre resistência mecânica e redução de peso para o ADI comparativo a diversos materiais [Hayrynen 2002].**

Apesar de suas excelentes propriedades mecânicas, o nodular austemperado é restringido em alguns casos, devido à:

Receio de projetistas de substituir materiais classicamente utilizados (como aço), por um material em recente desenvolvimento como o ADI, de ótima resistência mecânica, mas utilizado em menor % no mundo.

Controles de processo mais rigorosos com composição química, inoculação, tratamento de nodulização, ou seja, uma produção mais rigorosa, visando diminuir defeitos no bruto de fusão ao máximo, objetivando favorecer as propriedades mecânicas finais, após o tratamento de austêmpera.

Controle do tratamento térmico de austêmpera, mais rigorosos com relação à temperatura e meios de resfriamento, para se evitar o campo da perlita e bainita e, obter a estrutura final da ausferrita. Com isso, requerendo equipamentos mais adequados nas fundições, para o ciclo de tratamento térmico.

Devido também, ao seu custo de produção mais elevado em relação ao nodular normalizado, porém com condições de competir com aços forjados e fundidos em resistência mecânica.

Devido a sua combinação de propriedades mecânicas de resistência à fadiga, resistência ao desgaste e alongamento, o ADI pode substituir aços forjados e fundidos de resistência mecânica similares, e até substituir o alumínio em projetos de componentes, sem perda de resistência do componente projetado, com possível redução de peso do componente e significativa redução de custos. [Machado M.A 2007].

O ADI possui uma microestrutura denominada *Ausferrita*, devido sua matriz metálica ser composta de austenita de alto carbono e ferrita acicular. Esta microestrutura é obtida somente através do tratamento térmico de austêmpera. Devido sua estrutura, o ADI possui um ótimo desempenho de resistência à fratura, resistência à tração, tenacidade e alongamento, sendo um material com ótimas propriedades mecânicas e competitivo no mercado tendo, propriedades antes somente vistas em aços fundidos e forjados.

### 2.3 Propriedades mecânicas dos Ferros Fundidos Nodulares Austemperados:

As propriedades mecânicas do ADI variam entre uma faixa de valores, que dependem de fatores do controle microestrutural como principalmente, das condições do tratamento térmico aplicado, as fases da microestrutura (quantidade, tamanho e distribuição), ou do seu processo de fabricação, como os nódulos de grafita (tipo, tamanho e forma) formados durante a solidificação, defeitos microestruturais, como porosidade, inclusões, segregação de elementos e precipitados de 2º fase.

Os elementos de liga remanescentes se formam no contorno de grão intercelular durante a solidificação, devido à segregação. Podemos citar alguns fatores que, diminuem a resistência à tenacidade no ADI, como baixa porcentagem de nodularização, alta quantidade de carbonetos intercelulares e micro porosidades na matriz bruta de fusão [B. Stokes 2006].

Algumas especificações são fornecidas por empresas do ramo de fundição e institutos de pesquisa, mundialmente. Utilizaremos a norma ASTM 897/A 897M-03 que especifica para nodular suas propriedades mecânicas de resistência, energia ao impacto, microestrutura e classificação da liga:

Tabela 1: Propriedades mecânicas do ADI, segundo a classificação ASTM 897/A.

Propriedade	Grau I 900/650/09	Grau II 1050/750/07	Grau III 1200/850/04	Grau IV 1400/1100/02	Grau V 1600/1300/01
LR	900 MPa	1050 MPa	1200 MPa	1400 MPa	1600 MPa
LE	650 MPa	750 MPa	850 MPa	1100 MPa	1300
A <sub>50</sub>	9 %	7 %	4 %	2 %	1 %
I*	100 J	80 J	60 J	35 J	20 J
Dureza**	269-341 HB	302-375 HB	341-444 HB	388-477 HB	402-512 HB

\*Corpo de prova Charpy não entalhado a temperatura de  $22 \pm 4$  °C.

\*\* Esfera de aço de 10 mm com carga de 3.000 kg

Quanto à composição química, a norma não define uma composição fixa para a produção do ADI, mas fornece uma faixa de composição química, discriminada na tabela 2:

Tabela 2: Faixa de tolerância da composição química para os ADI's.

Ferro base:	Composição/Tolerância
C:	$3,6 \pm 0,2\%$
Si:	$2,5 \pm 0,2\%$
Mn:	$0,025 \pm 0,005\%$
P:	0,04%
S:	0,02%
Elementos de Liga:	
Cu	0,80%
Mo	0,30%
Ni	2,00%

Conforme Machado [2007], para espessuras de peça até 18 mm não é necessário utilizar um ferro fundido nodular ligado para se realizar austêmpera, pode-se austemperar um componente a partir de um ferro fundido nodular com matriz perlítica- ferrítica, baixa liga.

Quanto à microestrutura, a norma especifica alguns parâmetros entre eles:

- Matriz predominante ausferrita (Austenita de alto carbono e ferrita acicular)
- Densidade de nódulos de 100 nódulos/ mm<sup>2</sup> no mínimo.

## 2.4 Solidificação dos ferros fundidos nodulares

A solidificação dos ferros fundidos nodulares ocorre, de forma similar a dos ferros fundidos em geral, conforme mostrado na figura 4. A partir do resfriamento do líquido (1560°C), temos o resfriamento da liga até a primeira linha de transformação líquido + austenita (composição hipoeutética) ou líquido + grafita (composição hipereutética). A partir daí no resfriamento, temos em equilíbrio líquido + austenita ou líquido + grafita, respectivamente. Abaixo de 1135° C, tem-se a solidificação de austenita + grafita estável até 728° C, abaixo, seguindo o resfriamento até a temperatura ambiente, podemos ter a solidificação de duas fases, ferrita + grafita, composição muito hipoeutética, ou perlita + grafita, composição próxima a eutética. Nos ferros fundidos nodulares, tem-se a peculiaridade de que, a grafita se forma na forma esferoidal, formando nódulos em uma matriz de perlita ou ferrita, ou ambos. Esta formação em nódulos ocorre, devido à ação de um elemento nodularizante, o magnésio que, através da adição de uma liga Fe-Si-Mg reage com o banho líquido e através de uma reação exotérmica, libera calor e propicia a formação esferoidal da grafita no ferro fundido, durante a solidificação. [Colpaert H. ,1959].

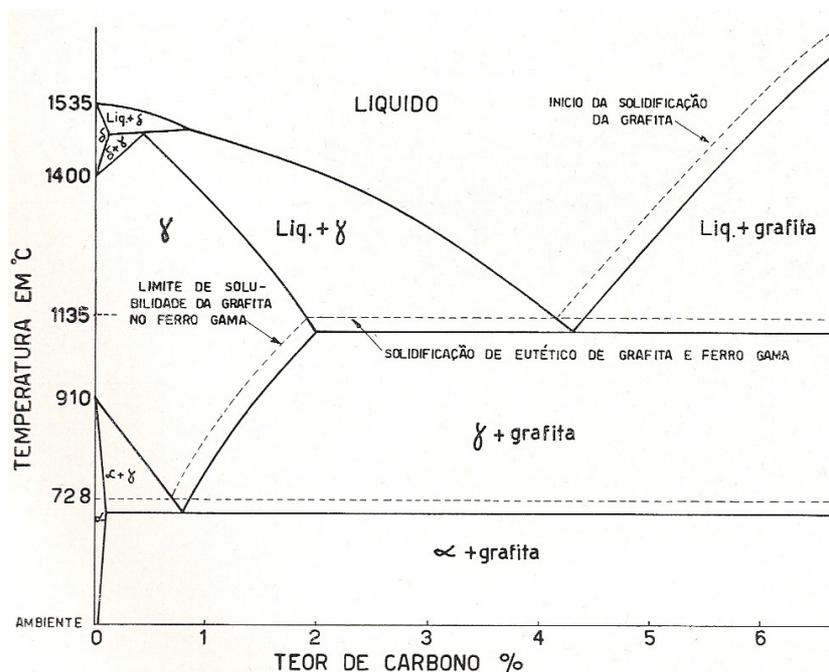
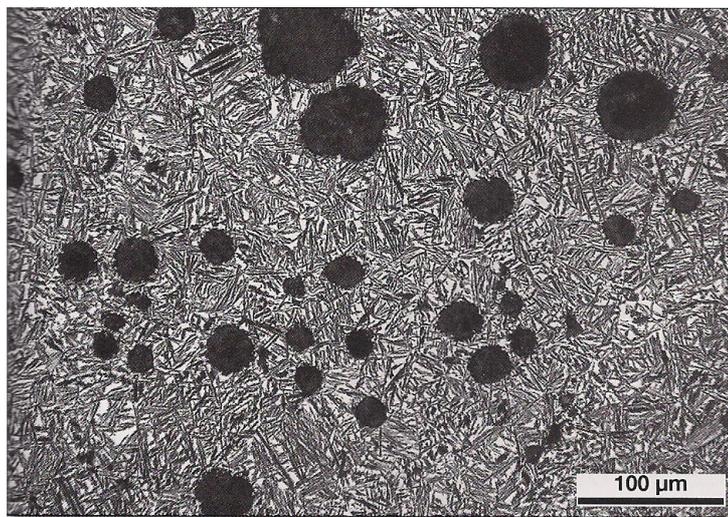


Figura 4: Diagrama Fe-C de solidificação para os ferros fundidos [Colpaert H. -1959].

## 2.5 Tratamento térmico de Austêmpera nos ferros fundidos nodulares

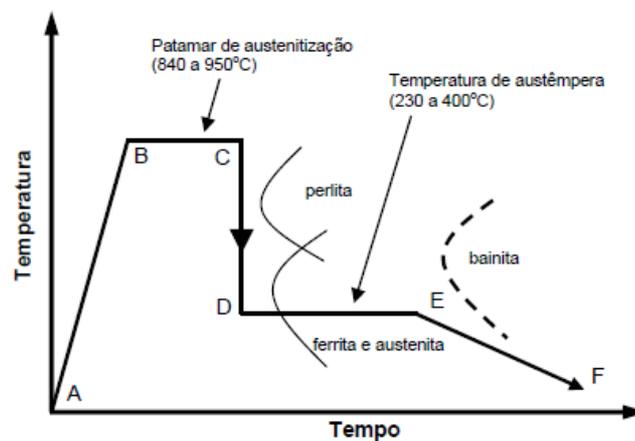
Nos ferros fundidos os elevados teores de carbono e silício presentes, fazem com que neste material a reação de austêmpera ocorra, diferentemente do que nos aços, deslocando as curva de formação de fases TTT de acordo com a liga. Nos aços formam-se ferrita acicular e carbonetos e, a esta estrutura denomina-se *bainita*. Nos ferros fundidos nodulares, forma-se uma mistura de duas fases, ferrita acicular e austenita de alto carbono, chamada *ausferrita*, conforme visualização na figura 5. Sua austemperabilidade, pode ser definida como a capacidade de ser resfriada a partir do campo austenítico, promovendo a formação da estrutura ausferrita e, diferentemente do que nos aços, queremos evitar a formação de perlita, ferrita e *bainita* na estrutura.



**Figura 5: Austenita de alto carbono e ferrita acicular - caracterizando a ausferrita [Colpaert 4° Ed.2008].**

Sua microestrutura é composta por uma matriz chamada *ausferrita*, que significa austenita de alto carbono e ferrita acicular. Essa estrutura é obtida através de um tratamento térmico de austenitização aplicado à liga. O ciclo de tratamento térmico é geralmente, composto por um aquecimento controlado até a faixa de austenitização BC, entre 840° C e 950° C, conforme descrito na figura 6. Após, o material permanece por um determinado tempo nesse patamar,

até que toda austenita esteja enriquecida em carbono o suficiente, (trecho BC). Depois efetua-se um resfriamento rápido até a faixa intermediária de 230 °C até 400° C onde ocorre a *austempêra*, evitando-se a região de formação da perlita (Trecho DE). Permanece-se nesse patamar por um tempo suficiente para que toda austenita rica em carbono se transforme em ausferrita.(austenita de alto C e ferrita acicular). Neste trecho, não se recomenda variações de temperatura superiores a 11° C para evitar a formação de outras fases .Finalmente, realiza-se um resfriamento lento e controlado, ao ar, evitando-se o campo da bainita até a temperatura ambiente.



**Figura 6: Ciclo de tratamento térmico projetado para austêmpera em ferros fundidos nodular [ Hupalo M. F -2006].**

## 2.6 Aspectos sobre mecânica da fratura em materiais metálicos.

A Mecânica da fratura Linear elástica MFLE é uma das metodologias que podem ser empregada em situações onde pode ocorrer fratura sem deformação plástica apreciável na ponta da trinca. Essa restrição à deformação plástica pode ser em função das propriedades intrínsecas do material como em aços de elevada resistência à tração, ou por fatores geométricos, em que por exemplo pode-se alcançar o estado de deformação plana do material se houver espessura suficiente ou a temperatura de teste for muito baixa. A Mecânica da fratura linear-elástica pode ser empregada satisfatoriamente à medida que a zona plástica for pequena em relação ao tamanho da trinca e das dimensões da estrutura que contém o defeito.

### 2.6.1 Modos de carregamento pela MFLE

Pela MFLE existem três modos de carregamento possíveis em uma trinca, divididos em:

I – Abertura da ponta da trinca

II- Cisalhamento puro. Ocorre o deslocamento das superfícies da trinca paralelamente a si e perpendiculares a frente de propagação.

III- Rasgamento- deslocamento das superfícies da trinca, paralelamente à si mesmas.

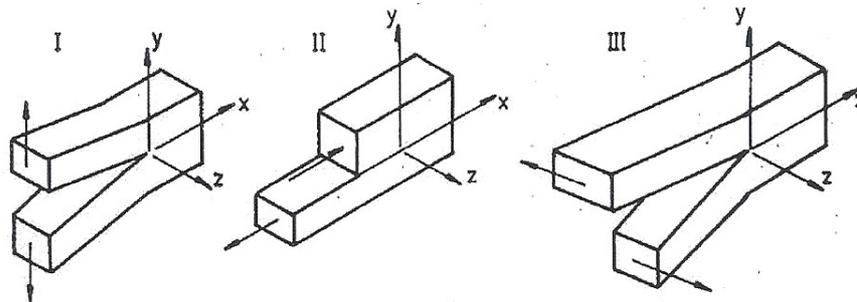


Figura 7: Modos de carregamento possíveis em uma trinca [Stroaecker. T.R Mecânica da fratura 2000].

É importante destacar que para um dado modo de carregamento, a distribuição de tensões em torno de qualquer trinca em uma estrutura no regime linear-elástico é semelhante, sendo descrita pelo parâmetro K. Ou seja, a diferença de tensões entre componentes trincados depende apenas do parâmetro fator intensidade de tensões K, que é governado pela configuração geométrica do componente trincado e, pelo nível de tensões e modo de carregamento na estrutura.

### 2.6.2 Aplicações da Mecânica da Fratura:

O fator intensidade de tensões  $K_{IC}$  é uma propriedade do material e, o seu valor pode ser utilizado na análise de qualquer geometria para o cálculo do tamanho crítico de defeito de trincas em estruturas. O valor de  $K_{IC}$  para diferentes geometrias e modos de carregamento, considerando uma placa para o caso de uma trinca de comprimento  $2a$  e tensão trativa, pode ser estimado por:

$$K_{IC} = \sigma \cdot (\pi \cdot a)^{0,5} \text{ Equação 1}$$

Em materiais reais as tensões são limitadas pelo escoamento plástico localizado na região à frente ponta da trinca, denominada zona plástica. Consideremos que, uma vez que o tamanho da zona plástica seja pequeno, em relação ao campo governado pelo fator intensidade de tensões  $K_{IC}$ , esta zona plástica poderá ser considerada somente como uma pequena perturbação no campo elástico, controlado pelo  $K_{IC}$ , não afetando o cálculo do fator de intensidade  $K$ . [Strohacker. T.R- Mecânica da fratura-1999].

A norma para determinação do valor de  $K_{IC}$  ASTM E-399 90 também determina que:

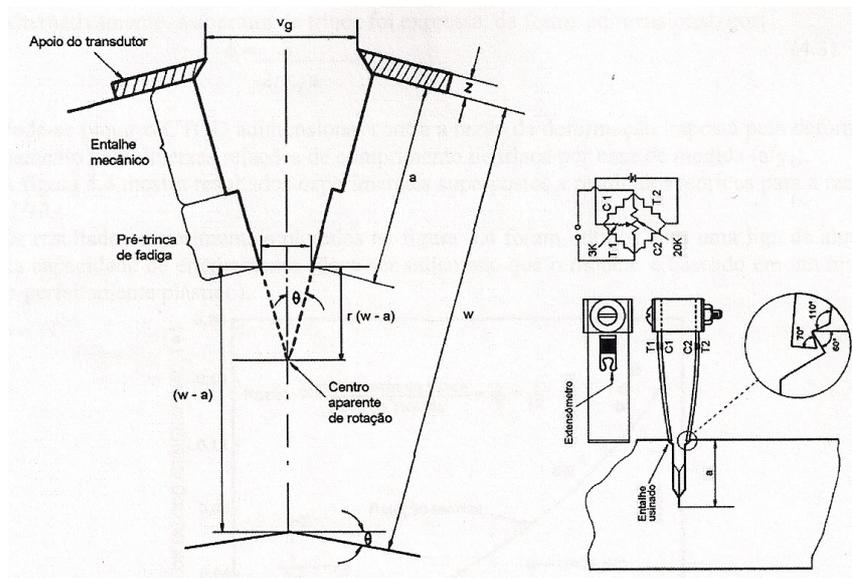
$$a, B, b > 2.5 * \frac{(K_{IC})^2}{\sigma_e^2} \text{Equação 2}$$

Onde  $B$  é a espessura do corpo de prova,  $b$  é o ligamento e  $a$  é o tamanho da trinca. Através desta relação podemos afirmar que um componente é governado o estado de deformação plana e, que a MFLE pode ser aplicada satisfatoriamente. O valor do fator intensidade de tensões  $K_{IC}$  está diretamente relacionado com o tamanho do defeito e a tensão aplicada na estrutura.

Neste trabalho o alvo de estudo foi determinar a resistência à fratura  $K_{IC}$  para três condições de austêmpera, através do ensaio de tenacidade à fratura, avaliando o fator intensidade de tensões para cada temperatura ensaiada.

Para os ensaios de tenacidade à fratura  $K_{IC}$ , o corpo de prova deve possuir um pré-entalhe usinado e, deve-se realizar uma pré-trinca de fratura antes de ensaiar o material. O ensaio é realizado em uma máquina universal de fadiga, aplicando tensões crescentes até a propagação da trinca e a fratura do corpo de prova.

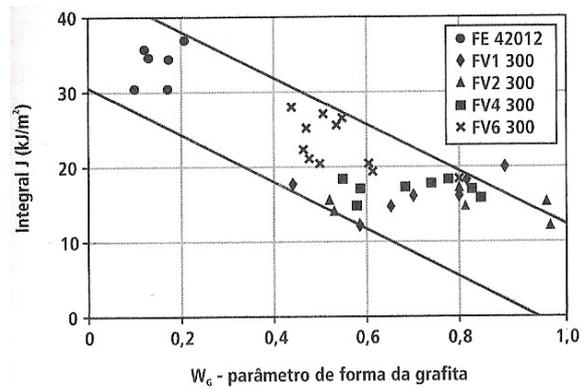
A medida da abertura da trinca é registrada por extensômetros (Clip gauges), fixados nos corpos de prova antes do ensaio, bem como o nível de tensões aplicado em cada corpo de prova ensaiado.



**Figura 8:Ampliação da pré-trinca de fadiga no corpo de prova e,em detalhe a fixação dos extensômetros de medição da abertura da trinca no ensaio [Strohaecker, 1999].**

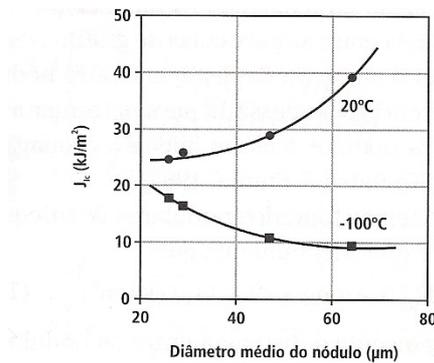
## 2.7 Considerações sobre resistência à fratura em ferros fundidos nodulares:

Segundo Guessser [2009], a forma da grafita tem efeito significativo na tenacidade à fratura, para os ferros fundidos nodulares de matriz ferrítica, como pode ser visualizado na figura 09, o efeito na tenacidade versus o parâmetro  $W_G$ , utilizado como parâmetro de forma da grafita. Guessser também afirma que ocorre diminuição da tenacidade à medida que diminui a distância entre os nódulos de grafita. O aumento da distância entre nódulos, aumenta a energia necessária para deformação da matriz entre os nódulos de grafita iniciar a propagação da trinca.



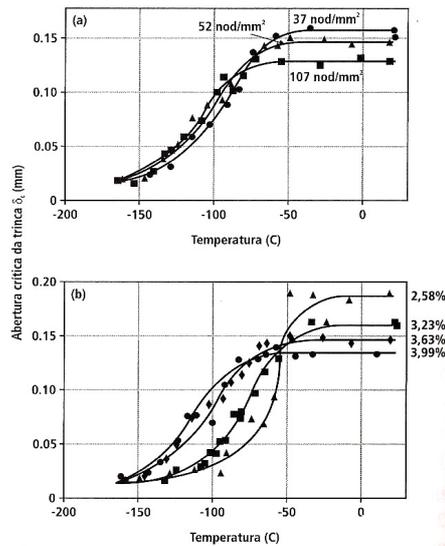
**Figura 9: Efeito da forma da grafita sobre a tenacidade à fratura (Integral J) para diversos ferros fundidos com matriz ferrítica [Guesser 2009].**

Sob baixas temperaturas, quando a propagação da fratura ocorre por clivagem, ocorre um fenômeno oposto, em que quanto maior o número de nódulos de grafita, maior a resistência a tenacidade em ferros fundidos ferríticos, conforme verificado pela figura 10 através do método da integral J:



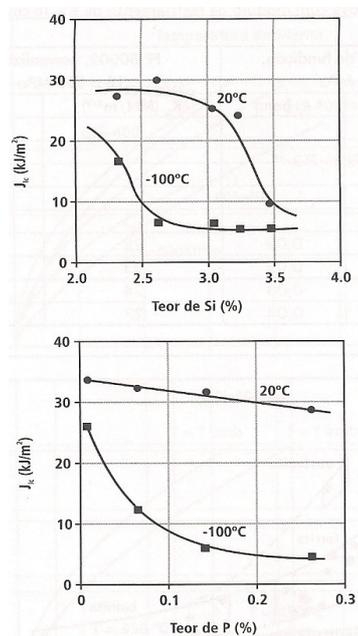
**Figura 10: Influência da temperatura na resistência a tenacidade(J), em função do tamanho de nódulos de grafita [Guesser, 2009].**

Outra tendência sobre a tenacidade, é que ocorra diminuição da resistência a tenacidade no patamar dúctil e diminuição do tempo de transição, com o aumento do número de nódulos de grafita, comprovados experimentalmente através da figura 11, em que mostra o resultado de ensaios abertura da trinca em função da temperatura, para diferentes números de nódulos de grafita.



**Figura 11: Abertura crítica da trinca em função da temperatura, para ferros fundidos com diferentes teores de carbono(%) e número de nódulos(nód/mm<sup>2</sup>)[Guesser, 2009].**

Em nodulares ferríticos, o aumento do teor de %P e %Si diminui a resistência a tenacidade dos ferros fundidos. Este efeito é mais pronunciado com a diminuição da temperatura, e pode ser explicado devido ao endurecimento por solução sólida provocada por esses elementos.



**Figura 12: Influencia do Si e P na resistência a fratura (J) para ferros fundidos nodulares ferríticos [Guesser, 2009].**

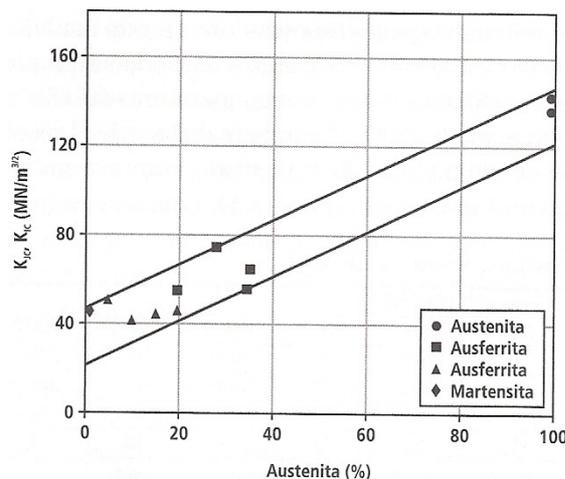
Em ferros fundidos nodulares com matrizes ferrítica e perlítica, verifica-se que a matriz ferrítica possui maior resistência a fratura do que a matriz perlítica, conforme dados apresentados na figura 12.

Em geral, verifica-se que a tenacidade decresce com o aumento da resistência do ferro fundido nodular. Estes resultados podem ser visualizados na tabela 02, para diversas classes de ferro fundidos nodulares, segundo a norma ISO 1083/JS, onde o  $K_{IC}$  decresce à medida que aumenta a resistência da liga.

**Tabela 02:** Resultados de  $K_{IC}$  para diversos tipos de ferros fundidos nodulares segundo ISO 1083/JS, verifica-se a diminuição do fator de intensidade de tensões à medida que a resistência mecânica da liga aumenta.

característica	unid	Classe ISO 1083/JS/									
		350-22	400-18	450-10	500-7	550-5	600-3	700-2	800-2	900-2	500-10
LR min	MPa	350	400	450	500	550	600	700	800	900	500
LE min	MPa	220	240	310	320	350	370	420	480	600	360
Along min	%	22	18	10	7	5	3	2	2	2	10
$K_{IC}$	MN/m <sup>3/2</sup>	31	30	28	25	22	20	15	14	14	28
Microestrutura predominante		ferrita	ferrita	ferrita	ferrita-perlita	ferrita-perlita	perlita-ferrita	perlita	perl ou mart rev	mart rev (1)(2)	ferrita

Já para os ferros fundidos nodulares austeníticos, ligados ao Mo e Ni, verifica-se experimentalmente, um aumento da resistência a fadiga, em função de sua microestrutura apresentar maior resistência, quanto maior for a % de austenita na matriz.



**Figura 13:** Influência da % de austenita na resistência a tenacidade em ferro fundidos nodulares ligados, tratados termicamente [Guesser, 2009].

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Confeccção da liga de trabalho e corpos de prova

Primeiramente, fundiu-se a liga em blocos Y de segundo ASTM A897, de dimensões 200mm x 90 mm x 18mm, produzidos através de fundição em areia verde junto à Ferrabraz/Becker, em forno indutivo de 2.000kg, utilizando a liga de ferro fundido nodular 65-45-12, vazados à temperatura de 1370°C. A moldagem dos blocos para confecção dos corpos de prova pode ser visualizada na figura 14.



**Figura 14: Moldagem do bloco para fusão da liga e bloco fundido em nodular 65-45-12.**

Após a produção dos blocos Y, os mesmos foram jateados e rebarbados, conforme podemos ver na figura 15. Na próxima etapa, realizamos a usinagem dos corpos de prova em máquina fresadora, nas dimensões segundo norma ASTM E-399, padronizadas conforme o desenho técnico discriminado pela figura 15.

As dimensões finais do corpo de prova foram  $w= 40$  mm,  $B= 10$  mm e  $L= 48$  mm.

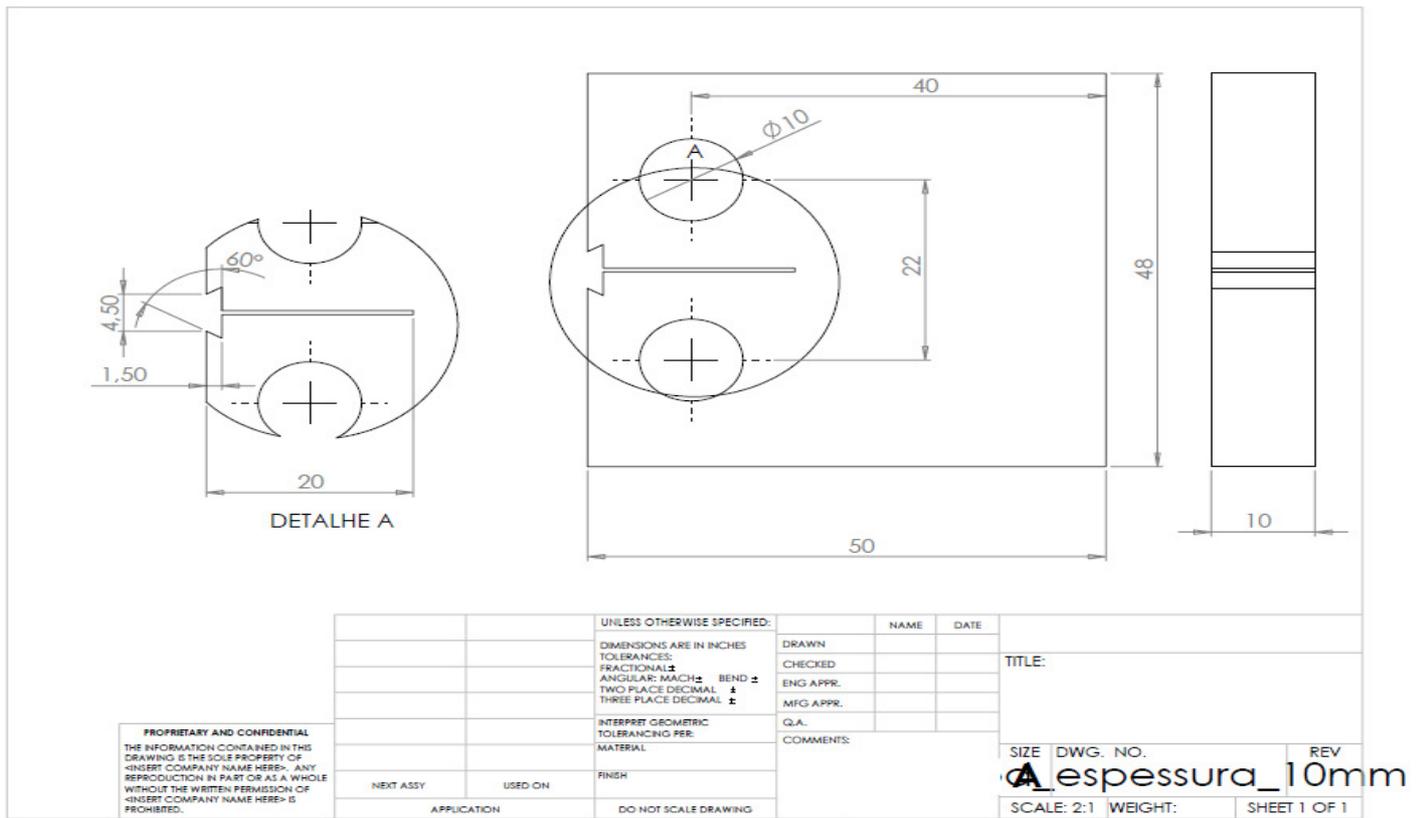


Figura 15: Dimensões do corpo de prova para ensaio de tenacidade tipo CT, segundo norma ASTM E 399-90.

### 3.2 Tratamento térmico aplicado aos corpos de prova:

Após o processo de usinagem, os corpos de prova de ferro fundido nodular foram submetidos ao tratamento térmico, em forno de banho de sais, junto a Forjas Taurus. Primeiramente, os corpos de prova foram austenitizados a 900°C, seguido de tratamento isotérmico de austêmpera por uma hora em banho de sais neutro, seguido de resfriamento lento ao forno até a temperatura ambiente. Os mesmos foram nomeados por AT1, AT2 e AT3, sigla para austêmpera na temperatura de 280, 300 e 320°C respectivamente, como pode-se observar através da figura 16:



**Figura 16: Corpos de prova tratados termicamente.**

### 3.3 Ensaio de tenacidade à fratura

Os corpos de prova tratados termicamente foram submetidos aos ensaios de  $K_{IC}$ , em máquina servo-hidráulica marca MTS, modelo MTS 810, conforme figura 17, junto ao Laboratório de Metalurgia Física LAMEF da UFRGS, com o objetivo de avaliar a influência das diferentes temperaturas de austêmpera, na resistência a fadiga do material, calculando o  $K_{IC}$  para cada temperatura. Primeiro foi necessário realizar um pré-entalhe no corpo de prova, conforme a figura 08, para poder realizar o ensaio na máquina. Inicialmente é necessário um período para a abertura de uma pré-trinca de fratura no material, conforme norma ASTM E-399. Após os corpos de prova tratados foram submetidos a uma tensão crescente até ocorrer à fratura dos corpos de prova. A tensão aplicada e o deslocamento do clip gauge são registrados com apoio de um software acoplado ao equipamento de ensaio.



Figura 17: Máquina universal de ensaio de fadiga com dispositivo de fixação de ensaio em detalhe.

### 3.4 Caracterização metalúrgica

Os corpos de prova bruto de fusão e tratados termicamente, foram caracterizados quanto sua microestrutura através de análise metalográfica padrão, lixamento plano nas granulometrias 100, 220, 320, 400, 600 e 1200, seguido de polimento em máquina politriz com pasta de diamante 4 micron e 1, após ataque metalográfico com reagente Nital 2%, para visualização da microestrutura, resultante nos ferros fundidos nodulares austemperados. As análises microestruturas foram visualizadas em Microscópio metalúrgico Olympus-BX 60M, e os ensaios de dureza em cada corpo de prova AT1, AT2 e AT3, foram realizados em durômetro padronizado em escala *Brinell (HB)*, junto ao Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

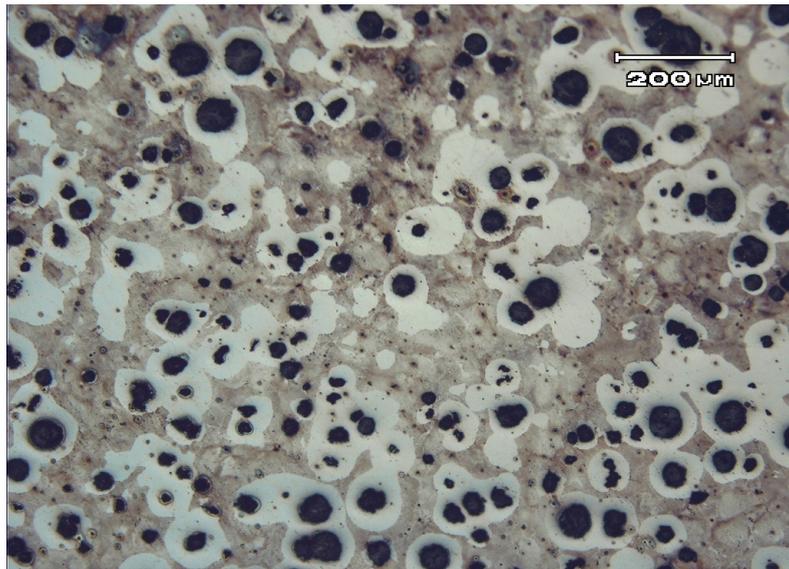
Os resultados de à análise química da liga de ferro fundido nodular 65-45-12, realizadas junto ao Laboratório Metalúrgico da Ferrabraz/Becker, podem ser visualizados conforme a tabela 3, evidenciando o comparativo entre norma e os resultados fornecidos pela análise:

Tabela 3: Composição química da liga, comparativo entre resultados e recomendado por Norma.

Análise	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mg	%S	%P
01	3,57	2,75	0,274	0,043	0,062	0,018	0,032
02	3,50	2,77	0,287	0,045	0,077	0,0154	0,037
03	3,31	2,80	0,283	0,045	0,046	0,0165	0,0336
Média	3,46	2,77	0,281	0,044	0,061	0,0165	0,034
Recomendado (ASTM A536)	3,20 - 3,80	2,00 - 2,80	0,50- 0,90	0,07 máx.	0,03- 0,07	0,04 máx.	0,08 máx.

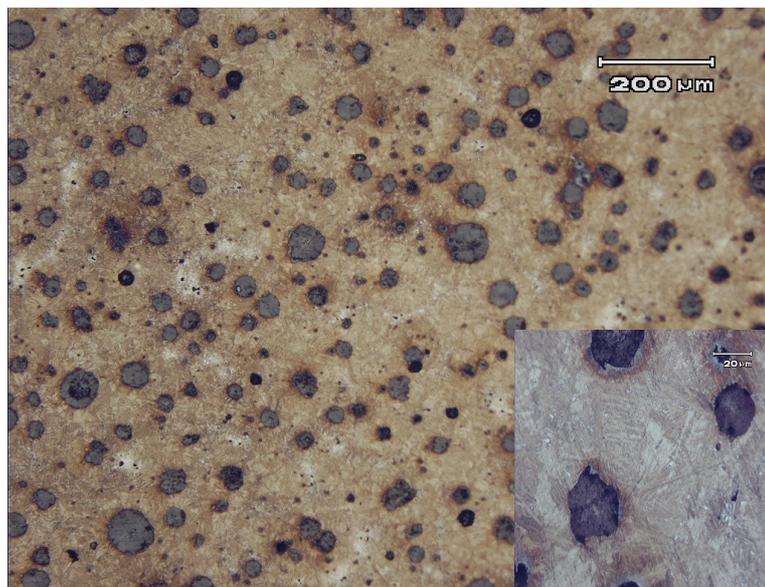
A microestrutura resultante, nos corpos de prova bruto de fusão e, após tratamento térmico AT1 (280°C), AT2 (300°C) e AT3(320°C), podem ser visualizadas respectivamente nas figuras 17, 18, 19 e 20.

A estrutura da liga de ferro fundido nodular bruta de fusão, pode ser visualizada na figura 18. Podemos observar uma estrutura formada por aproximadamente 45% de perlita e 45% ferrita, com tamanho de nódulo de 5 a 6, conforme os padrões de visualização da ASTM- A-536 para ferro fundido nodular.

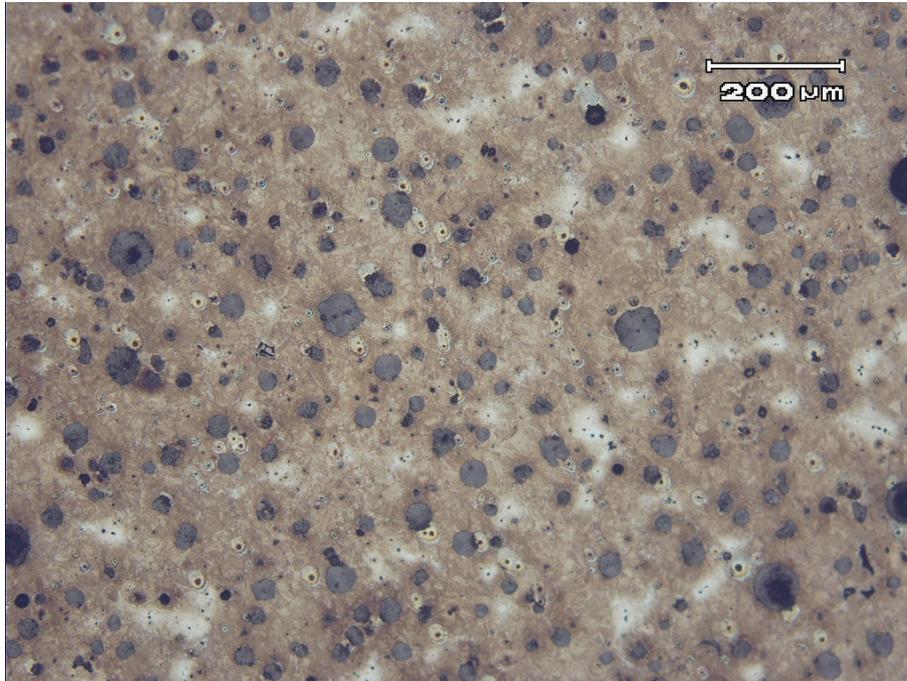


**Figura 18: Microestrutura da liga bruta de fusão 65-45-12, após o processo de fundição e areia verde.  
Microestrutura formada por perlita e ferrita.**

Nas estruturas das figuras 19 e 20, podemos observar a estrutura da liga de ferro fundido nodular após tratamento térmico, nos corpos de prova AT1-1 e AT2-2. A microestrutura resultante é formada por austenita de alto carbono e ferrita acicular, na forma de agulhas, resultando assim, na estrutura chamada de ausferrita, que é característica dos ferros fundidos nodulares austemperados, os ADI's, objetivo do tratamento térmico.

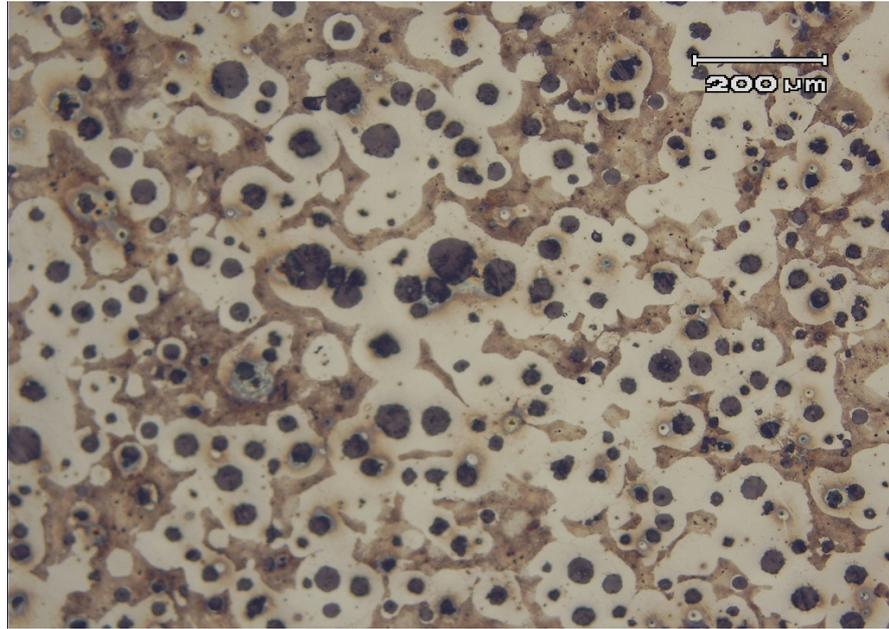


**Figura 19: Microestrutura do corpo de prova AT1-1 formada por austenita de alto carbono e ferrita após a austêmpera a 280°C. No detalhe, a microestrutura de ausferrita em 1000x.**



**Figura 20: Microestrutura do corpo de prova AT2-2 formada por austenita de alto carbono e ferrita após a austêmpera a 300°C.**

A estrutura resultante dos corpos de prova à temperatura de 320°C (AT3) após ataque químico, apresentou perlita e ferrita na matriz, mostrando que não ocorreu austenitização nem resfriamento isotérmico no tempo suficientes, para ocorrer a transformação da microestrutura bruta de fusão em ausferrita, como ocorreu nas temperaturas de 280°C e 300°C.



**Figura 21: Microestrutura do corpo de prova AT3-1 após tratamento térmico a 320°C. Pode-se verificar que o tratamento térmico não foi eficaz nesta temperatura.**

Os resultados obtidos pelo ensaio de dureza Brinell, para cada corpo de prova tratado termicamente e bruto de fusão, descritos na tabela 4:

Tabela 4: Resultados obtidos no ensaio de dureza Brinell (HB)

Medida	AT1	AT2	AT3
1	260	260	195
2	250	270	190
3	260	260	190
Média	255	265	191,6

Média do bruto de fusão: 202 HB

A partir dos valores de dureza encontrados nos ensaios, foi possível aproximarmos uma estimativa da resistência a tração da liga austemperada, para cada temperatura de tratamento, através da equação 3, uma aproximação de Callister (1994), mesmo sendo aplicado somente para aços, foi utilizada para fins de comparativos de resistência à tração em ferros fundidos nodulares.

$$\sigma = \alpha.HB \quad \text{Equação 3}$$

Assumimos alfa sendo igual a 3,40 para aços-carbono tratados termicamente, podemos calcular os valores de resistência mecânica aproximada para cada corpo de prova tratado termicamente, conforme os resultados mostrados na tabela 5.

Tabela 5: Resistência mecânica estimada a partir do valor de dureza Brinell. (Callister,1994).

Corpo de prova ensaiado	AT1	AT2	AT3
Dureza média (HB)	255	265	191,66
Resistência mecânica estimada (MPa)	867	901	651,6

Através dos ensaios de  $K_{IC}$  em máquina universal servo-hidráulica, podem ser registrados, os valores de carga aplicados aos corpos de prova e plotar os resultados em uma curva experimental para cada corpo de prova tratado nas respectivas temperaturas AT1, AT2 e AT3 respectivamente:

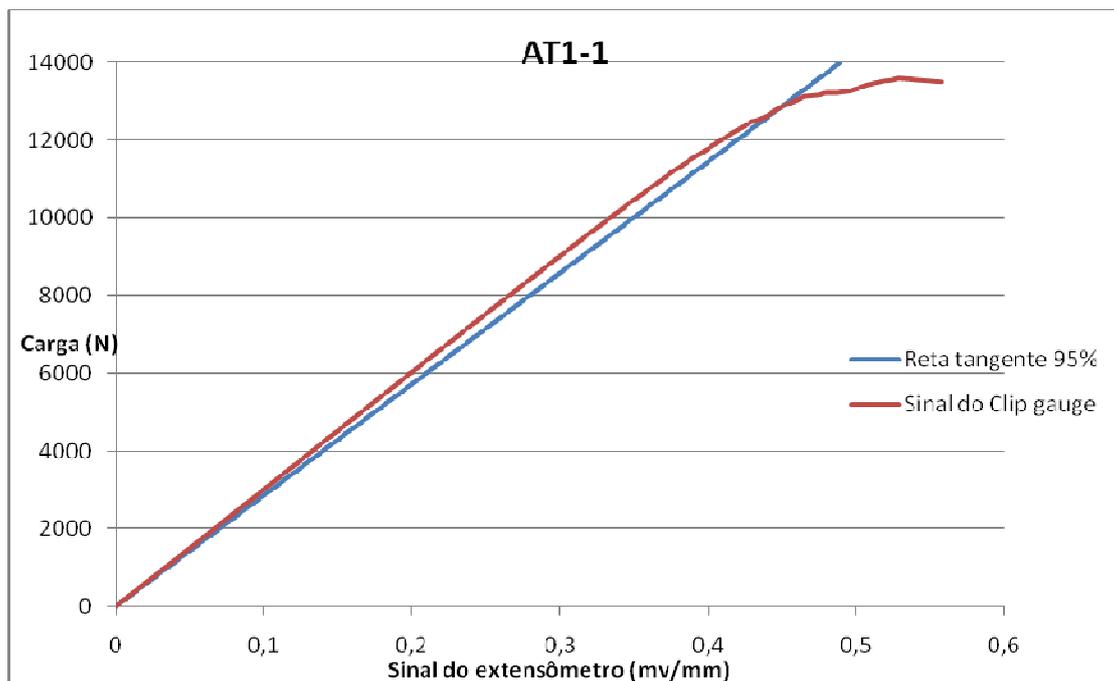


Figura 22: Gráfico resultante do corpo de prova AT1-1mostrando o nível de tensões aplicado e o deslocamento no Clip Gauge.

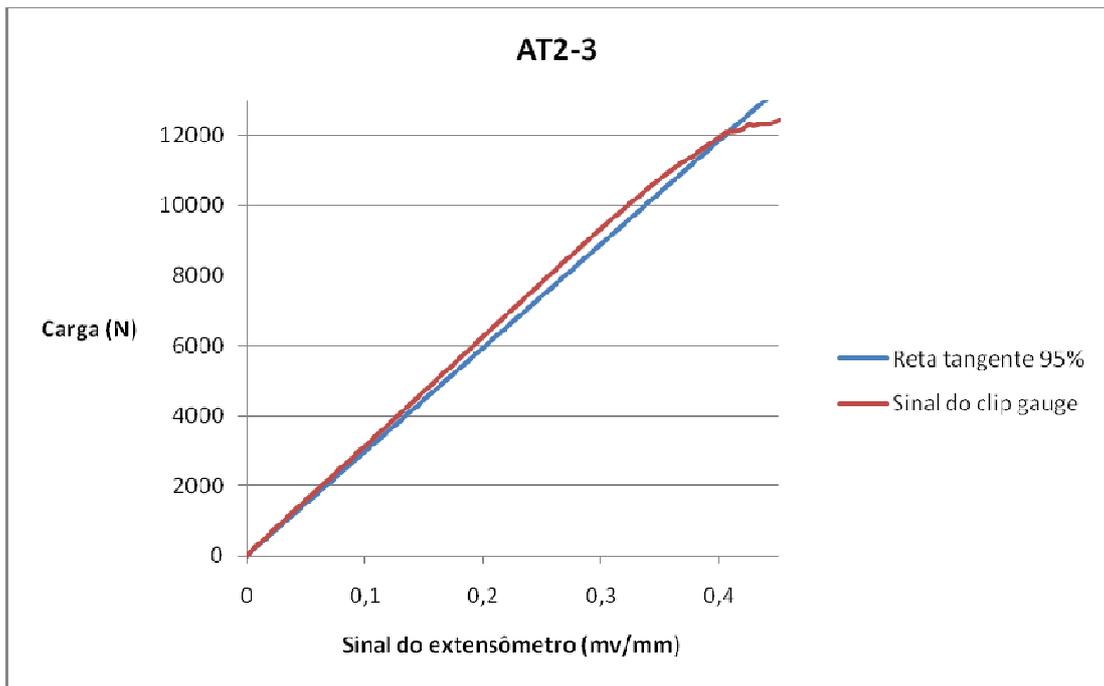


Figura 23: Gráfico resultante do corpo de prova AT2-3 mostrando o nível de tensões aplicado versus deslocamento no Clip Gauge

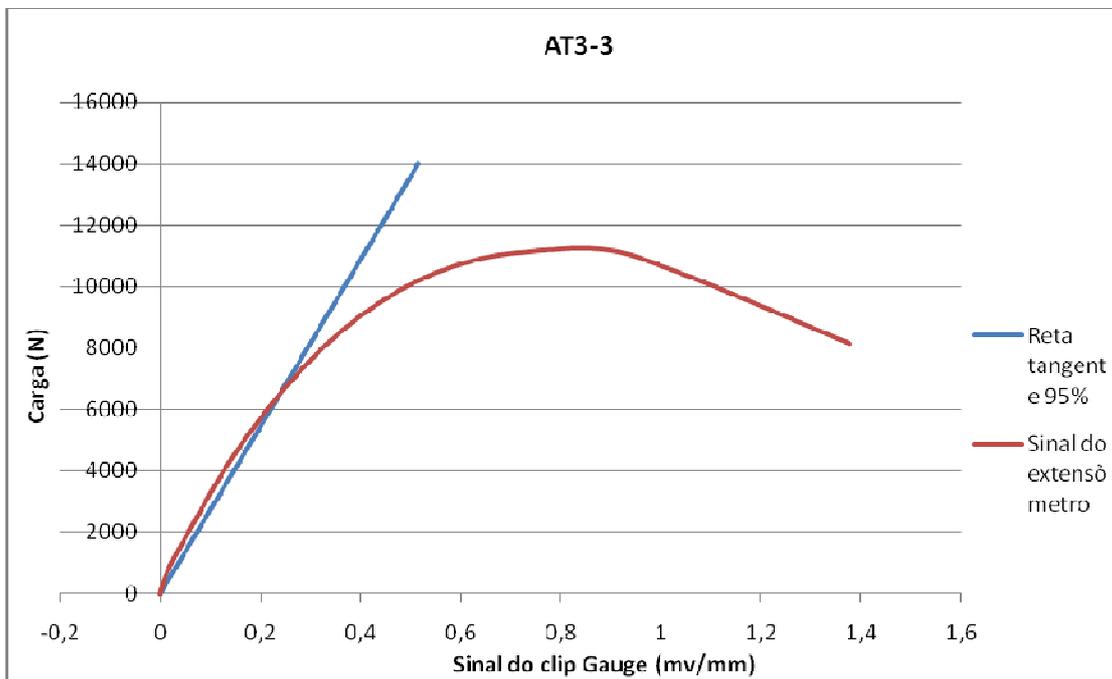


Figura 24: Gráfico resultante do corpo de prova AT 3-3 mostrando o nível de tensões aplicado versus deslocamento no Clip Gauge

A partir do valor de tensão à 95% da curva registrada pelo software foram calculados os valores de tenacidade à fratura, para os corpos de prova ensaiados. Os resultados do cálculo de  $K_{IC}$  para cada temperatura de tratamento mostraram valores conforme discriminadas pela tabela 5:

Tabela 5: Resultados dos ensaios de tenacidade à fratura para os corpos de prova em ADI.

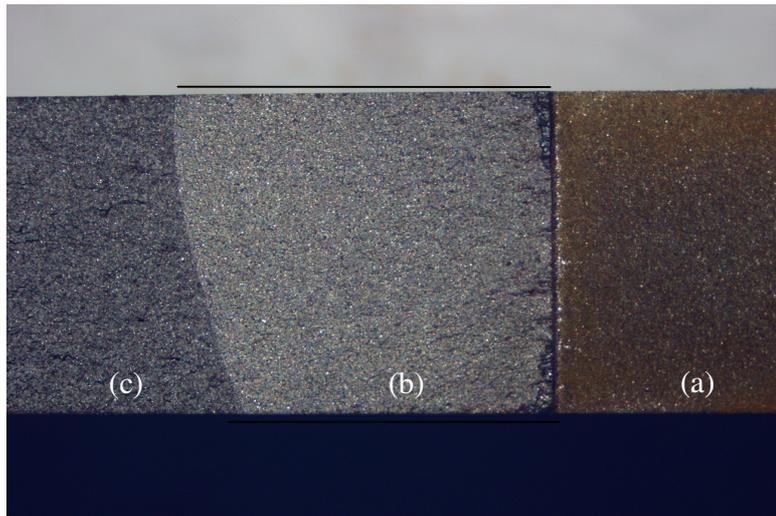
Corpo de Prova	$K_{IC}$ (MPa.m <sup>0,5</sup> ).
AT1-1	41,7
AT1-2	42,8
AT2-3	38,5
AT2-2	37,9
AT3-1	Não validado
AT3-2	Não validado

Os corpos de prova AT1, AT2 e AT3, significam as temperaturas de austempêra respectivamente.

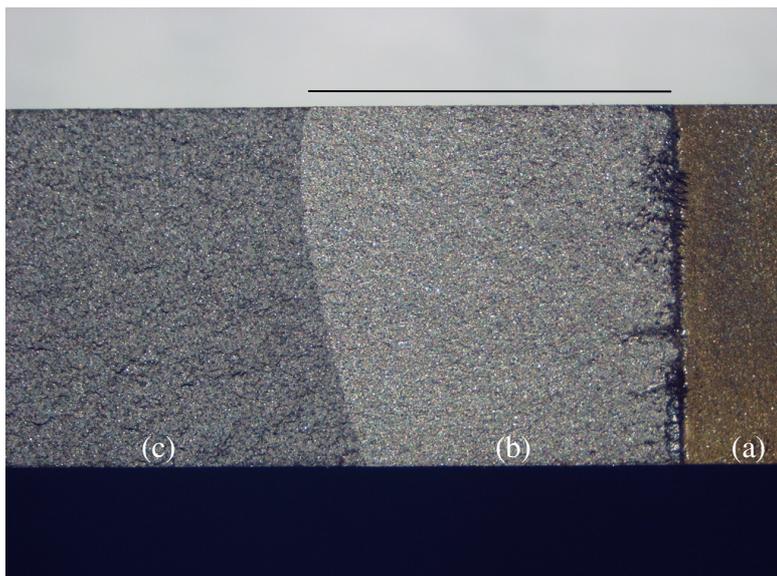
Após os ensaios também foi possível observar a fractografia das peças ensaiadas em cada temperatura AT1, AT2 e AT3, respectivamente, mostrando como a fratura catastrófica ocorreu no ensaio, para cada corpo de prova tratado e, as possíveis causas de falhas nos materiais e suas conseqüências nos ensaios:

A análise visual das fractografias mostrou nitidamente as regiões de entalhe no corpo de prova (a), zona de pré-trinca fraturada (b) e zona fraturada (c), conforme podemos visualizar nas figuras 25, 26, 27 e 28.

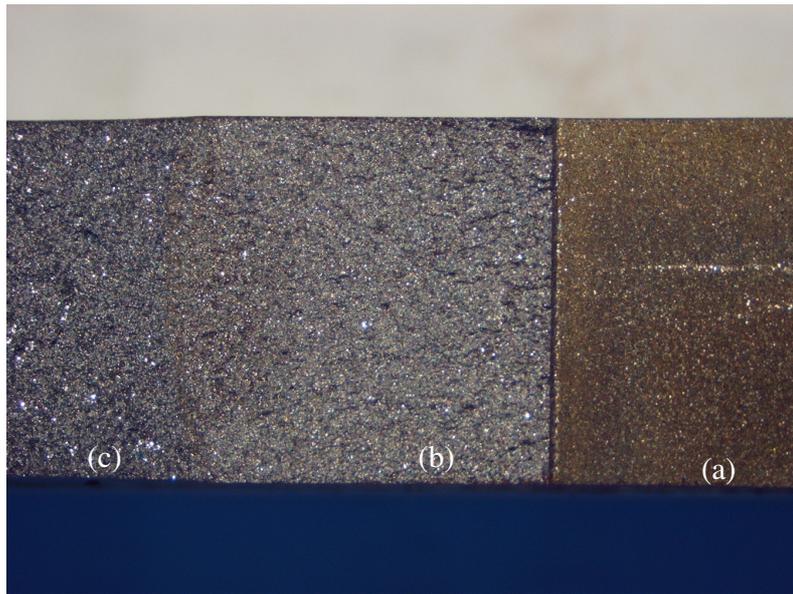
Pode-se observar que na região (b) houve maior propagação em um lado da pré-trinca, o que provavelmente tenha ocorrido devido a um possível deslocamento de um dos furos de fixação do corpo de prova.



**Figura 25: Fratura do corpo de prova CTOD –AT1 austemperado, 67x de aumento mostrando a região do entalhe (a), região da pré-trinca apresentando maior propagação na região superior (b) e a região de propagação catastrófica da trinca(c)**

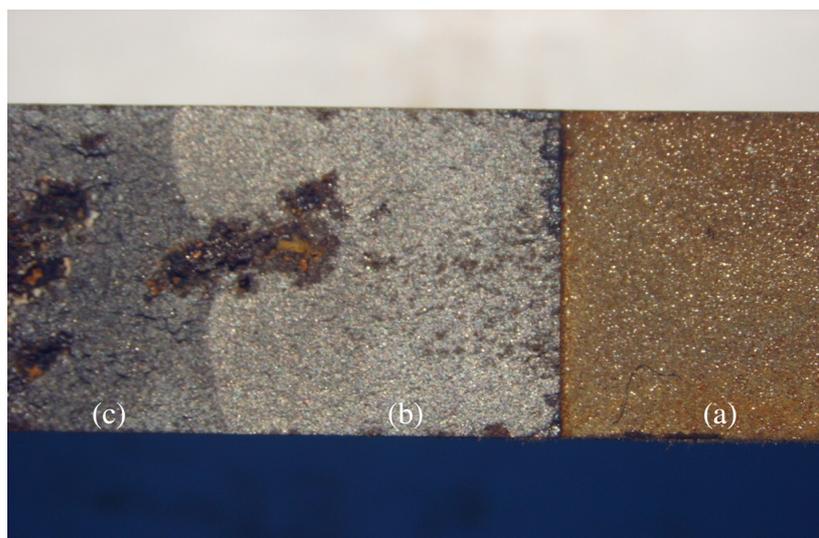


**Figura 26: Fratura do corpo de prova CTOD –AT2 austemperado, 67x de aumento, mostrando a região do entalhe(a), região da pré-trinca apresentando maior propagação na região superior (b) e a região de propagação catastrófica da trinca(c)**



**Figura 27: Fratura do corpo de prova CTOD –AT3-2 austemperado, 67x de aumento, mostrando a região do entalhe(a), região da pré-trinca apresentando maior propagação na região superior (b) e a região de propagação da trinca(c).**

No corpo de prova AT3-3, pode-se observar que ocorreu o fenômeno de fechamento de trinca, devido à diferença de velocidade de propagação da trinca, próxima a região de uma não conformidade na estrutura do metal, neste caso, uma inclusão de areia com origem no processo de fusão do metal.



**Figura 28: Imagem da fratura do corpo de prova CTOD AT3-3 67x de aumento. Inclusões de areia oriundas do processo de fundição estão contidas na estrutura do material.**

## 5. CONCLUSÕES

A partir dos ensaios de dureza e caracterização metalúrgica, pode-se observar que se obteve os maiores valores de  $K_{IC}$  para a temperatura de austêmpera de 280°C, corpo de prova AT1, respectivamente 41,7 e 42,8  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$ . Mostrando uma microestrutura formada por ausferrita na matriz.

Para a temperatura de austêmpera 300°C, (AT2) obtemos valores de  $K_{IC}$  de respectivamente 37,9 e 38,5  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$ , com uma microestrutura formada por 100% ausferrita, porém menores valores de tenacidade em relação à AT1 (280°C).

Para austêmpera a 320°C a microestrutura resultante foi perlita e ferrita devido a problemas no processo de tratamento térmico, não ocorrendo transformação da estrutura bruta de fusão em ausferrita, o que invalidou os resultados obtidos de  $K_{IC}$  para esta temperatura. Além disso, o material apresentou inclusões de areia na matriz da estrutura bruta.

Ao final, pode-se concluir que os ensaios de  $K_{IC}$  para os corpos de prova tratados a 280° C corresponderam ao melhor desempenho nos ensaios, devido aos maiores valores de  $K_{IC}$  e uniformidade de microestrutura final de ausferrita.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Desenvolvimento de parâmetros de tratamento térmico de ferro fundido nodular austemperado- ASTM Grau II, Machado A. M –UFRGS 2007.

Avaliação de austemperabilidade de um ferro fundido nodular casse perlítica(FE-70002) em corpos de prova com 50 mm de espessura. M.F . Hupalo –SOCIESC 2006

John R. Keough and Kathy L. Hayrynen -Properties of Austempered Ductile Iron., Resources for Casting Designers and Buyers.

Influência do tempo de austêmpera nas propriedades à fadiga do ferro fundido nodular austemperado, J.F. Dias , Faculdade de Engenharia-Universidade de Itaúna/MG/Brasil.

Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns, Colpaert H. 1959 –Editora Blücher.

Callister, 1994- Ciência dos Materiais-Volume

Contribuição para o estudo de fratura frágil em ferros fundidos nodulares. Contribuição técnica n° 1904- Congresso Anual da ABM;Rio de Janeiro,1985

Mechanisms of fatigue crack growth in Austempered Ductile Iron . G.L Greno, J.L Otegui, R.E Boeri

Effects of graphite nodules on crack growth behavior if Austempered Ductile Iron, B. Stokes, N. Gao, P.A.S Reed.

Strohaecker T. R. Mecânica da Fratura- Laboratório de Metalurgia Física- LAMEF/UFRGS

Guesser, W.L. Propriedades mecânicas dos ferros fundidos. 2009.

Putatunda, Susil K. Dependence of fracture toughness of austempered ductile iron on austempering temperature. Metallurgical and Materials Transactions A. Vol. 29A. 1998.

Sinatora, Amilton, et. al. Contribuição para o estudo de fratura frágil dos ferros fundidos nodulares ferríticos. Metalurgia ABM. Vol. 42. 1986.

## **7. TRABALHOS FUTUROS**

- Realizar austêmpera na temperatura de 320° C e comparar os valores de  $K_{IC}$  com as outras temperaturas ensaiadas.

- Avaliar possíveis diferenças microestruturais com as temperaturas de austêmpera.