

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE GAMA / FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE
DE MATERIAIS DA ENGENHARIA.**

**ENSAIOS MECÂNICOS E CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS
APLICADOS À CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE UM FERRO FUNDIDO E POLIESTIRENO**

ROLAN EMILIO RAMÍREZ RAMÍREZ

**ORIENTADORA: Prof. Dra. Carla Tatiana Mota Anflor
Co-Orientador: Prof. Dr. Volker Franco Steier**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM INTEGRIDADE
DE MATERIAIS DA ENGENHARIA**

BRASÍLIA/DF: JUNHO – 2017

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE GAMA / FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE
DE MATERIAIS DA ENGENHARIA.**

ROLAN EMILIO RAMÍREZ RAMÍREZ

**ENSAIOS MECÂNICOS E CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS
APLICADOS À CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE UM FERRO FUNDIDO E POLIESTIRENO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA DA FACULDADE GAMA E FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA.

**ORIENTADORA: CARLA TATIANA MOTA ANFLOR
CO-ORIENTADOR: VOLKER FRANCO STEIER**

**BRASÍLIA
2017**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE GAMA / FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE
DE MATERIAIS DA ENGENHARIA.

ENSAIOS MECÂNICOS E CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS
APLICADOS À CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE UM FERRO FUNDIDO E POLIESTIRENO

ROLAN EMILIO RAMÍREZ RAMÍREZ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA DA FACULDADE GAMA E FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA.

APROVADA POR:



Prof. Dra. Carla Tatiana Mota Anflor
(Orientador)



Profa. Dra. Sandra Maria Da Luz
(Examinador Interno)



Prof. Dr. Gilberto Gomes
(Examinador Externo)

BRASÍLIA, JUNHO DE 2017

FICHA CATALOGRÁFICA

ROLAN EMILIO RAMÍREZ RAMÍREZ

ENSAIOS MECÂNICOS E CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS APLICADOS À CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM FERRO FUNDIDO E POLIESTIRENO

[Distrito Federal] 2017.

104.p. 210 x 297 mm (FGA/FT/UnB, Mestre, Integridade de Materiais da Engenharia, 2017).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade UnB Gama.

Programa de Pós-Graduação em Integridade de Materiais da Engenharia.

- | | |
|---|---------------------------------|
| 1. Caracterização Mecânica de Materiais | 2. Ferro Fundido Nodular GGG 40 |
| 3. Correlação Digital de Imagens | 4. Poliestireno |

I. FGA/FT/UnB

II. FGA.DM - 047A/2017

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RAMÍREZ, R. R. (2017). ENSAIOS MECÂNICOS E CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS APLICADOS À CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM FERRO FUNDIDO E POLIESTIRENO Dissertação de Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia, Publicação N°. 047a/2017. Faculdade UnB Gama/FT/Universidade de Brasília, DF, 104.p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: ROLAN EMILIO RAMÍREZ RAMÍREZ.

TÍTULO: ENSAIOS MECÂNICOS E CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS APLICADOS À CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM FERRO FUNDIDO E POLIESTIRENO

GRAU: Mestre ANO: 2017

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Rolan Ramirez

ROLAN EMILIO RAMÍREZ RAMÍREZ

RUA DAS ROSAS, CASA 39, DVO, BAIRRO GAMA.

Brasília, DF – Brasil.

*Dedico este trabajo a mi madre,
que aún desde lejos, siempre fue
la motivación para seguir adelante.*

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Miriam Ramírez, por sempre me animar em todas as minhas decisões. Muito obrigado, mãe, por toda compreensão e apoio durante o tempo de sacrifícios e distância.

À minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Carla Tatiana Mota Anflor, por ser um excelente exemplo e incentivo no mundo acadêmico. Muito obrigado pelas orientações e motivações que me fizeram sempre sentir que fiz a escolha certa. Muito obrigado pela enorme paciência que com certeza foi me orientar. Sempre será uma parte fundamental na minha formação.

A todos os integrantes do Grupo de Mecânica Experimental e Computacional (GMEC) da UnB, ao Prof. Dr. Jhon Nero Vaz Goulart, e especialmente ao meu colega e amigo Niécio pelo grande apoio em todos os momentos.

Aos que me acolheram e me fizeram sentir como parte da sua família, Sivaldo Barbosa Leite e Eurides Santos Brito, que graças a eles a minha estadia no Brasil foi bem mais fácil e agradável, pela imensa ajuda e pelo carinho que a sua família me fez sentir, muito obrigado mesmo.

Aos laboratórios de materiais e de análise instrumental do programa de pós-graduação em integridade de materiais da UnB-Gama, pela disponibilidade e colaboração nos processos experimentais de caracterização desenvolvidos no presente trabalho. Mais um agradecimento ao Grupo de Mecânica experimental por disponibilizar o equipamento de correlação digital de imagem para uso constante durante o presente trabalho.

Agradecimentos às entidades CAPES, DPP e UnB pelas suas contribuições na educação.

E a todos mais que de alguma forma contribuíram para a execução deste trabalho. Muito obrigado a todos vocês!

RESUMO

O Ferro Fundido Nodular GGG 40 e o poliestireno (PS) reciclado são materiais muito usados na atualidade em projetos de engenharia. O primeiro é uma liga metálica composta principalmente de ferro com mais de dois por cento de Carbono representado em inclusões de grafita. O PS é um polímero de estireno, que neste trabalho a matéria prima do PS foi obtida do processo de reciclagem do poliestireno expandido (EPS), ou mais comercialmente conhecido como isopor.

O objetivo principal deste trabalho consiste em conhecer as principais propriedades do ferro fundido GGG 40 e o PS. O trabalho apresenta uma caracterização mecânica desta liga metálica e do material polimérico através de ensaios mecânicos e da técnica de correlação digital de imagens (CDI). A partir do conhecimento de tais características, como a composição química, comportamento térmico e do comportamento da resistência e deformação perante diferentes tipos de esforços será possível prever o comportamento do material.

O comportamento mecânico do material será analisado mediante a observação dos campos de deslocamentos e deformações resultantes apresentados após a deformação nos ensaios de tração. Para realizar tais medições será usada uma técnica de CDI, técnica que é capaz de obter as deformações em tempo real e em toda a superfície do corpo de prova, obtendo dados mais coerentes com a realidade do que um extensômetro convencional. Esta técnica ótica é considerada uma tecnologia moderna que contém o hardware e software necessário para avaliar o comportamento de deformação dos corpos de prova.

Palavras-Chave: Ferro fundido Nodular GGG 40; Poliestireno (PS); Correlação digital de imagens (CDI).

ABSTRACT

Nodular Cast Iron GGG 40 and recycled polystyrene (PS) are widely used in engineering projects today. The first is a metallic alloy composed mainly of iron with more than two percent carbon represented in graphite inclusions. PS is a polymeric material which in its pure state is synthesized from styrene polymerization, but in this work the PS raw material was obtained from the recycling process of expanded polystyrene (EPS), or more commercially known as styrofoam.

The main objective of this work is to know the main properties of cast iron GGG 40 and PS. The work presents a mechanical characterization of this metal alloy and the polymeric material through mechanical tests and the technique of Digital Image correlation (DIC). From the knowledge of such characteristics, as the chemical composition, thermic behavior and the behavior of the resistance and deformation before different types of efforts will be possible to predict the behavior of the material.

The mechanical behavior of the material will be analyzed by observing the resulting displacement and strain fields after the deformation in the tensile tests. To carry out such measurements, a CDI technique will be used, which is capable of obtaining deformations in real time and on the entire surface of the specimen, obtaining data more coherent with reality than a conventional strain gage. This optical technique is considered a modern technology that contains the necessary hardware and software to evaluate the deformation behavior of the specimens.

Keywords: Cast Iron Nodular GGG 40; Polystyrene (PS); Digital Image Correlation (CDI).

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ferros fundidos: a) cinzento; b) branco; c) maleável; d) Nodular	11
Figura 2.2 – Microestrutura básica e processo dos ferros fundidos comuns.....	11
Figura 2.3 - Superfície com padrão de pontos e malha uniforme.....	20
Figura 2.4 – Análise de um subconjunto da superfície antes e depois da deformação	20
Figura 2.5 – Sistema de CDI Q-400 da empresa DANTEC Dynamics.....	21
Figura 3.1 – Processos do material para obtenção do PS: a) EPS reciclado, b) Material após prensado, c) PS triturado, d) PS depois da extrusão.	23
Figura 3.2 – Analisador térmico SDT Q600 da TA Instruments.....	26
Figura 3.3 – Cadinho de alumina na análise de TGA.....	27
Figura 3.4 – Sistema Charpy para ensaio de Impacto.	28
Figura 3.5 – Guia de aparência da fratura do corpo de prova.....	28
Figura 3.6 – Gráfico de resistência ao impacto para diferentes temperaturas.	29
Figura 3.7 – Medidas do corpo de prova para o teste de impacto.....	30
Figura 3.8 – Corpos de prova de GGG 40 antes do ensaio de impacto.....	30
Figura 3.9 – Durômetro Durotwin – D Plus da empresa Mitutoyo.	34
Figura 3.10 – (a) Politriz Polipan 2D da Pantec. (b) Tecido de poliéster.	34
Figura 3.11 – Comportamento típico gráfico Tensão – Deformação.....	36
Figura 3.12 – Máquina de tração INSTRON 8801.....	38
Figura 3.13 – Corpos de prova retangulares de GGG 40 para ensaio de tração.	40
Figura 3.14 – Corpo de prova cilíndrico de GGG 40 usado para ensaio de tração...	41
Figura 3.15 – Corpos de prova do poliestireno usados para ensaio de tração.	42
Figura 3.16 – Corpos de prova para ensaio de tração de PS (Em cima) e compósito de PS com fibra de bagaço de cana-de-açúcar (Embaixo).	42
Figura 3.17 – Câmera do Sistema de CDI Q-400 da empresa DANTEC Dynamics.	43
Figura 3.18 – Padrões de pontos desenhados nos corpos de prova de a) Poliestireno (PS), b) Ferro fundido nodular GGG 40.	44
Figura 3.19 - Placa de calibração DANTEC DYNAMICS AI MBM 11 mm.....	45
Figura 3.20 – Parâmetros de calibração e resíduo do sistema de CDI.	45
Figura 3.21 – Montagem do sistema de CDI e corpo de prova no ensaio de tração.	46
Figura 3.22 – Malha gerada pelo sistema de CDI sobre RDI em corpo de prova de tração.	47

Figura 4.1 – Imagem do MEV do Ferro Fundido Nodular GGG 40 com resolução de 200 μm .	49
Figura 4.2 – Classificação do tipo de grafita dentro dos ferros fundidos.	50
Figura 4.3 – Termograma. Gráfico de massa contra temperatura do material GGG 40.	52
Figura 4.4 – Derivada dm/dT do termograma.	52
Figura 4.5 – Gráfico da temperatura versus energia absorvida de impacto do GGG 40	55
Figura 4.6 – Aparência das faces fraturadas dos corpos de prova de GGG40.	56
Figura 4.7 – Relação entre a dureza Brinell do material e a resistência à tração.	59
Figura 4.8 – Gráfico tensão–deformação para corpos de prova retangulares, corpos de prova <i>a, b</i> .	60
Figura 4.9 - Gráficos tensão–deformação para corpos de prova cilíndrico usando CDI. Corpos de prova <i>c, d, e, f, g</i> .	62
Figura 4.10 – Corpo de prova <i>g</i> com evidente falha em forma de bolha no lugar da fratura.	63
Figura 4.11 – Valores médios da deformação lateral e longitudinal para calcular o coeficiente de Poisson.	64
Figura 4.12 – Variação do limite de escoamento (TE) em função da temperatura e tempo de nodularização.	67
Figura 4.13 - Resultados do CDI para GGG 40 no instante antes da fratura; a) Campo de deslocamentos, b) Campo de deformações, c) Corpo de prova fraturado	69
Figura 4.14 – Valor da deformação média em Y para cada fotografia, para os cinco (5) corpos de prova.	70
Figura 4.15 – Análise MEV sobre o PS reciclado reforçado com fibras de celulose de bagaço de cana-de-açúcar.	71
Figura 4.16 – Gráfico Tensão-Deformação para o PS e compósito de PS reforçado usando CDI.	72
Figura 4.17 – Resultados do CDI para o PS no instante antes da fratura; a) Campo de deslocamentos, b) Campo de deformações.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificações de ferros fundidos, microestrutura e processo de obtenção.....	12
Tabela 2.2 - Composição química do Ferro Fundido Nodular tipo GGG 40.....	13
Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas do ferro fundido nodular GGG 40.....	13
Tabela 3.1 – Tipos de ensaios de dureza e penetradores.	32
Tabela 3.2 – Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração convencional.	39
Tabela 4.1 – Porcentagem de componentes do GGG40 pelo MEV.....	50
Tabela 4.2 – Resultados ensaios de impacto do GGG 40 para diferentes temperaturas.....	54
Tabela 4.3 – Resultados ensaio de dureza Rockwell para GGG 40	57
Tabela 4.4 – Dureza Brinell para algumas ligas metálicas.....	58
Tabela 4.5 – Propriedades mecânicas de tração obtidas para GGG 40 usando extensômetro e CDI.	65
Tabela 4.6 - Resultados do ensaio de tração para o GGG 40 usando extensômetro e CDI.....	66
Tabela 4.7 – Propriedades mecânicas obtidas do GGG 40 e propriedades mecânicas médias de alguns metais e ligas metálicas.	68
Tabela 4.8 – Propriedades de tração para o PS e Compósito, propriedades de tração para o PS reciclado de outros autores.	72

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

FOFO	Ferro fundido
CDI	Correlação digital de imagens
GGG 40	Ferro fundido nodular tipo GGG 40
RDI	Região de interesse
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
TGA	Análise Termogravimétrica
PS	Poliestireno
EPS	Poliestireno Expandido
PMC	Composito de matriz polímerica
ε	Deformação
σ	Resistência à Tração
E	Modulo de elasticidade
ν	Coefficiente de Poisson

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	SOBRE OS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	1
1.2	SOBRE OS MATERIAIS A CARACTERIZAR	2
1.2.1	Ferro Fundido Nodular GGG40	3
1.2.2	Poliestireno (PS).....	4
1.3	MOTIVAÇÃO	4
1.4	OBJETIVOS DO TRABALHO	5
1.4.1	Objetivo Geral.....	5
1.4.2	Objetivos Específicos	5
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	6
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	MATERIAIS.....	7
2.1.1	Ferros Fundidos.....	8
2.1.2	Materiais Poliméricos.....	14
2.2	CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS VIA ENSAIOS MECÂNICOS.....	16
2.3	SISTEMA DE CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM (CDI).....	18
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS.....	22
3.2	ENSAIOS UTILIZADOS	24
3.2.1	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	24
3.2.2	Análise Termogravimétrica (TGA)	25
3.2.3	Ensaio de Impacto	27
3.2.4	Ensaio de Dureza	31
3.2.5	Ensaio de Tração.....	35
3.2.6	Técnica de Correlação Digital de Imagem (CDI)	42
4.	RESULTADOS E ANÁLISE	49
4.1	FERRO FUNDIDO NODULAR GGG 40.....	49
4.1.1	Análise MEV	49
4.1.2	Análise Termogravimétrica (TGA)	51
4.1.3	Ensaio de Impacto	53
4.1.4	Ensaio de Dureza	57

4.1.5	Ensaio de Tração.....	59
4.1.6	Técnica De CDI	68
4.2	POLIESTIRENO (PS) E COMPÓSITO DE MATRIZ DE PS REFORÇADO COM FIBRAS DE CELULOSE DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR	71
4.2.1	Análise MEV	71
4.2.2	Ensaio de Tração.....	71
4.2.3	Técnica de CDI	73
5.	CONCLUSÕES	76
6.	PROPOSTA DE CONTINUIDADE E PUBLICAÇÕES ORIGINADAS	79
Anexo 1.....		104

1. INTRODUÇÃO

Uma das maneiras mais comuns de avaliar as possíveis aplicações dos materiais na área da engenharia é conhecer suas principais propriedades mecânicas. É importante identificar quais são as resistências do material em relação ao seu comportamento mecânico e à solicitação de cargas.

As propriedades mecânicas de um material podem ser obtidas por meio de ensaios mecânicos de diferentes tipos. Souza (1982) propõe a escolha do ensaio mecânico sujeito à finalidade do material, onde é testado principalmente o tipo de esforço que o material vai sofrer na sua aplicação. Também se pode deduzir o caso inverso, onde podem ser realizadas diferentes solicitações de carga no material para depois analisar quais dessas solicitações apresentam uma melhor resposta. Estas solicitações são avaliadas por meio de ensaios mecânicos com os quais se podem determinar as suas possíveis aplicações.

Caracterizar um material da forma mais completa ajuda evitar também possíveis falhas causadas por desconhecimento da resistência deste ante algum esforço específico. Os principais tipos de esforços experimentados pelos corpos são o axial, de torção, flexão, cisalhamento ou pressão interna. Zolin (2011) explica, por exemplo, como o teor de Carbono influencia consideravelmente nas propriedades mecânicas das ligas ferrosas (Fe-C). Com o aumento da quantidade de carbono em ligas, a dureza e as tensões de escoamento e ruptura são melhoradas, entretanto a ductilidade e tenacidade são propriedades que sofrem declínio em seus valores. A importância de conhecer o mais amplamente as propriedades mecânicas do material se justifica na segurança dos projetos de engenharia.

1.1 SOBRE OS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

A confiabilidade dos projetos de engenharia tem uma direta ligação com os estudos realizados sobre o material antes e durante a sua aplicação. Esses estudos podem mostrar um modelo do comportamento real perante as diferentes solicitações

de carga do material, por tanto pode se afrontar de forma mais segura um projeto de engenharia real.

Existem diversos tipos de ensaios que avaliam as características físicas e químicas dos materiais, dependendo da propriedade que se deseja analisar. Hibbeler (2010) descreve os principais ensaios usados internacionalmente para caracterizar ótica e mecanicamente um corpo sólido. O teste de tração foi realizado para avaliar a resistência do material perante solicitações de carga de tensão axial. Também se avaliou a resistência do material à deformação plástica por meio de ensaios de dureza sobre a superfície do material. A partir do ensaio de impacto foi avaliado o comportamento frágil ou dúctil dos materiais quando submetidos a uma alta deformação.

Além do ensaio de tração convencional, onde é usado um extensômetro para obter os deslocamentos e deformações dos corpos de prova ensaiados, também é possível usar uma análise de correlação digital de imagens (CDI) para obter estes dados. Silva e Ravichandran (2011) e Bodelot et al. (2009) mostram alguns exemplos do uso da técnica de CDI para avaliar a deformação de um material, criando técnicas de aquisição simultânea entre a máquina de tração e o sistema de tomada de imagens que servem como referência para o presente trabalho.

A técnica de CDI é uma boa ferramenta de metrologia ótica capaz de fornecer informações precisas em relação aos campos de deslocamentos e de deformações em superfícies, com base no processamento digital de imagens. Pan et al. (2009) apresenta bons exemplos sobre os princípios e uso desta técnica, realizando um mapeamento da superfície em análise antes e depois da deformação. Depois desta avaliação das superfícies para as imagens digitais, são calculados os campos de deformações para cada imagem e são determinados os comportamentos da superfície do material.

1.2 SOBRE OS MATERIAIS A CARACTERIZAR

A escolha do material que será usado em alguns projetos de engenharia é uma das partes mais importantes que deve ser considerada no momento de avaliar a viabilidade de um projeto. Com o avanço da tecnologia e o elevado grau de exigência na engenharia em termos de qualidade, deve se procurar sempre

satisfazer as solicitações de esforço que deve suportar o material, visando sempre a melhor relação custo-benefício.

Em muitos projetos de engenharia são necessárias peças mecânicas que são submetidas a algum tipo de solicitação de carga. As solicitações podem ser suportadas por uma quantidade alta ou escassa de materiais que possuem uma variedade de preços e qualidades diferentes. Com a avaliação das propriedades mecânicas pode ser feita a escolha de um material que cumpra com as solicitações de carga do projeto, evitando falhas indesejadas e com um preço mais favorável que outro tipo de materiais que cumprem com o mesmo objetivo.

Será realizada, a continuação, uma breve introdução sobre os materiais usados neste trabalho, ressaltando as suas grandes diferenças em termos de estrutura, propriedades e comportamento mecânico.

1.2.1 Ferro Fundido Nodular GGG40

O ferro fundido tem se destacado como um material amplamente utilizado na produção industrial. Karaman e Çetinarslan (2010) expõem algumas razões pelas quais o ferro fundido nodular é preferido atualmente em muitos projetos industriais entre a grande família de ferros fundidos: o baixo preço em comparação com outros tipos de ligas metálicas e a semelhança nas suas características de resistência. Segundo os autores o preço do ferro fundido nodular apresenta um valor de 20 a 40% mais barato que o aço comercial. A resistência similar ao aço comercial e seu menor valor, fazem com que a relação custo-benefício seja fortemente considerada do ponto de vista de competitividade industrial. Outra característica do ferro fundido é sua boa usinabilidade, o que mais uma vez, o torna atrativo do ponto de vista econômico.

Apesar da grande diversidade de ferros fundidos e as diferentes classificações que são apresentadas em Chiaverini (2002), o ferro fundido com nódulos de grafita do tipo GGG 40 foi o material escolhido no presente trabalho. O bom equilíbrio entre as características de resistência, o relativo baixo custo e as boas propriedades de modelagem fazem deste material uma opção interessante de estudo.

1.2.2 Poliestireno (PS)

Os plásticos são materiais de uso comum na atualidade, sendo aplicados em uma quantidade gigantesca de produtos de uso comercial e industrial. Na maioria das vezes as pessoas tem contato com diversos tipos de plásticos sem saber sequer de qual tipo é, ou as suas principais características. Da quantidade de plásticos poliméricos existentes, o poliestireno (PS) é um dos mais usados.

O PS, no seu estado puro, é um termoplástico que é obtido da reação química conhecida como polimerização sobre o estireno¹.

A Ecoplas (2011), no seu boletim técnico do *Centro de Información Técnico* (CIT), expõe uma grande quantidade de aplicações possíveis para o PS, variando desde produtos básicos como recipientes e brinquedos, até carcaças de computadores e partes importantes de carros e aviões.

Neste trabalho será realizada a caracterização de algumas propriedades mecânicas de um PS reciclado e reforçado com fibras de celulose de bagaço de cana-de-açúcar.

1.3 MOTIVAÇÃO

O projeto de produtos na engenharia requer garantir a eficácia e confiabilidade nos tempos atuais, sendo cada vez mais rigorosa a avaliação da qualidade destes, sem deixar de lado o aspecto econômico, buscando sempre um equilíbrio entre qualidade e custo. Peças fundamentais na indústria atual como engrenagens, componentes de motores automotivos e industriais requerem um avanço cada vez maior no estudo da sua otimização e desempenho na engenharia.

Há uma grande variedade de materiais metálicos usados na indústria que possuem características de resistência diferentes, assim como, custos que variam de um para o outro. Um bom desempenho na escolha de materiais nos projetos de engenharia requer optar pela opção que consiga suportar adequadamente as cargas exercidas na peça sem pagar a mais por isto.

¹ Hidrocarboneto não saturado, produzido a partir do Benzeno e etileno em presença de um catalizador, Kantoviscki (2011).

Pretende-se pelo presente trabalho ampliar o conhecimento sobre as características mecânicas de um tipo de ferro fundido com incrustações de nódulos de grafita e um polímero reforçado com fibra natural.

1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem por objetivo principal a caracterização de dois materiais, um de tipo metálico e outro polimérico com a finalidade de avaliar as suas propriedades mecânicas.

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é a aplicação de ensaios mecânicos em conjunto com técnicas de correlação digital de imagem (CDI) para obter as principais propriedades mecânicas do Ferro Fundido Nodular do tipo GGG 40 e do PS reforçado com fibras de celulose de bagaço de cana-de-açúcar, assim como avaliar o comportamento do material ante algumas deformações nos ensaios.

1.4.2 Objetivos Específicos

Neste trabalho devem ser cumpridos alguns objetivos secundários com o fim de alcançar o objetivo principal.

- Serão tiradas algumas imagens de microscópio eletrônico de varredura com a finalidade de analisar a superfície de uma amostra do material e a sua composição química.
- Será feita também uma análise termogravimétrica para avaliar a variação da massa do GGG 40 em temperaturas elevadas.
- Devem ser determinados o tipo e quantidade de ensaios mecânicos a serem realizados com a finalidade de determinar as propriedades dos materiais caracterizados.
- Por serem sistemas independentes, também deve ser determinado um procedimento experimental que permita acoplar os tempos dos dados

obtidos no ensaio mecânico de tração e a CDI, a fim de observar os campos de deslocamento e deformação correspondentes às cargas.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A dissertação está dividida em seis capítulos apresentados da seguinte forma:

- **Capítulo 1:** Neste capítulo de introdução são apresentadas considerações iniciais e generalidades a fim de familiarizar o leitor com os principais tópicos abordados no trabalho. São descritos alguns procedimentos adotados, organização do texto e os objetivos do trabalho.
- **Capítulo 2:** É apresentada uma revisão bibliográfica que mostra os conceitos importantes envolvidos no presente trabalho, além de algumas publicações que utilizaram procedimentos similares e servem como base para o trabalho atual.
- **Capítulo 3:** Foram apresentados os materiais avaliados, os princípios básicos e os procedimentos seguidos durante o presente trabalho para caracterizar os materiais.
- **Capítulo 4:** São apresentados neste capítulo os resultados obtidos dos diferentes procedimentos experimentais com suas respectivas análises. Apresenta-se uma metodologia ótica de correlação digital de imagem (CDI) para determinar o comportamento físico dos materiais quando sofrem esforços de tração.
- **Capítulo 5:** O capítulo apresenta as conclusões finais deduzidas do presente trabalho.
- **Capítulo 6:** Considerações importantes, proposta de continuidade e publicações geradas do trabalho desenvolvido são apresentadas neste capítulo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados conceitos básicos dos materiais e procedimentos utilizados no presente trabalho.

É realizado um estudo dos materiais usados, iniciando por uma breve explicação dos tipos de materiais existentes e as suas classificações, para depois centrar o estudo às ligas metálicas de ferro fundido, pois um dos materiais usados corresponde a esta classificação. O outro material a ser estudado corresponde a um tipo de polímero reforçado com fibras naturais.

A revisão bibliográfica expõe alguns conhecimentos básicos e necessários sobre os ensaios e procedimentos necessários para realizar uma caracterização das propriedades mecânicas destes materiais.

Finalmente, a revisão bibliográfica contém os princípios e conceitos sobre a técnica de CDI, usada para avaliar o comportamento e medir as deformações do material em presença de esforços de tração.

2.1 MATERIAIS

Quando se fala da mecânica da massa e os seus princípios pode-se estar falando das duas partes de um conjunto, pois convencionalmente a mecânica dos sólidos e a mecânica dos fluidos são a divisão do termo conhecido como mecânica do meio contínuo. O presente trabalho aborda somente a parte conhecida como mecânica dos sólidos, deixando como hipótese a quase nula influência dos fluidos nas propriedades mecânicas do material.

Os sólidos, diferentemente de outros tipos de estados da matéria, se caracterizam por ter na sua microestrutura átomos e moléculas fortemente ligadas, daí derivam em grande parte as suas principais propriedades mecânicas.

A mecânica dos materiais se fundamenta principalmente em avaliar, desde o ponto de vista mecânico, as propriedades do material. Rice (1994) expressa que a preocupação principal desta área é avaliar a tensão, deformação e falha do material estudado. Askeland et al. (2012) também expressa que o objetivo de muitos cientistas e engenheiros de materiais é usar os exaustivos conhecimentos sobre

estes para inovar e melhorar de forma segura nos fenômenos e aplicações dos materiais.

Os materiais sólidos são comumente divididos em função da sua composição e microestrutura. Askeland et al. (2012) estabelece, por exemplo, que os materiais são divididos em metais e ligas, cerâmicas e vidros, polímeros, semicondutores e os compósitos. O presente trabalho foi centrado no estudo dos materiais metálicos e poliméricos, pois a matéria prima utilizada nos materiais corresponde a uma liga metálica e um compósito com matriz polimérica.

2.1.1 Ferros Fundidos

Os materiais metálicos tem a característica de possuir estruturas cristalinas e normalmente são bons condutores de energia elétrica, estes podem estar compostos por elementos metálicos exclusivamente, como também conter alguns elementos não metálicos. Em qualquer situação a composição do material possui uma quantidade maioritária de elementos metálicos.

Dependendo da quantidade de porcentagem de ferro que o material metálico possua pode ser classificado como metal ferroso ou não ferroso. No caso das ligas metálicas onde o ferro é o principal componente, são considerados metais ferrosos. O ferro fundido, por exemplo, é claramente um metal ferroso pela grande quantidade de ferro na sua composição química.

Na atualidade os materiais metálicos são usados amplamente em diversas áreas da engenharia. Smith e Hashemi (2006) ressaltam o uso deste tipo de material em projetos de aeronáutica, eletrônica, automotiva e na área da construção.

De forma geral pode-se dizer que o ferro fundido é uma liga de ferro e Carbono, comumente com mais de dois por cento (2%) de Carbono.

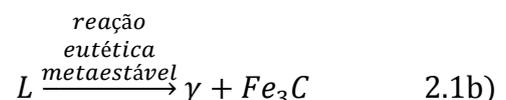
A UNESCO, por meio de sua revista *The Courier* (1988) identifica as origens do ferro fundido no quarto século antes de cristo e com a finalidade de criar diversas ferramentas de trabalho agrícola como utensílios para a cozinha e até brinquedos. Túmulos da dinastia chinesa Tang revelam que este grupo foi pioneiro na fabricação e uso do ferro fundido.

Inicialmente, os ferros fundidos foram classificados em dois grupos básicos e o seu nome foi baseado na cor predominante de sua fratura. Assim, foram

determinados os ferros fundidos branco e cinzento. De acordo com Davis (1996) no manual sobre ferros fundidos nodulares da ASM (Specialty Handbook Cast Irons), o tipo de ferro fundido que ia ser desenvolvido no processo metalúrgico dependia de vários fatores, entre os quais a composição e a taxa de esfriamento de fusão eram os mais determinantes.

O denominado ferro cinzento é formado quando esse carbono é precipitado em forma de grafita em flocos ou veias, possui uma aparência cinzenta e as ligas contêm aproximadamente um 12% de grafita do volume total. O ferro fundido cinzento é relativamente fácil de usinar e ainda que a sua ductilidade seja pouca, em comparação com o ferro fundido branco é menos frágil. Mas se o carbono é formado em cementita (Fe_3C), é obtido o denominado ferro branco devido à aparência da sua fratura branca brilhante. No começo, este tipo de ferro fundido foi pouco valorizado por possuir uma alta dificuldade na usinabilidade e ser ao mesmo tempo bastante frágil.

Chiaverini (2002) explica esta diferença dos ferros fundidos desde a microestrutura do material. Assim, quando se tem uma solidificação da liga líquida (L) de ferro e Carbono, e a reação eutética² é termodinamicamente estável, se forma o ferro fundido cinzento com grafita predominante na sua microestrutura, conforme equação 2.1a. Agora, se a reação eutética é metaestável, a equação 2.1b é a reação predominante, onde a cementita (Fe_3C) domina na microestrutura e forma o ferro fundido branco, onde γ representa a austenita no material como forma de ordenamento dos átomos de ferro e carbono na liga.



Uma vez que a fase sólida se transforme em outras duas sólidas, ou seja, o material sofre uma reação eutetóide³, a austenita é transformada em perlita, no entanto, com alguns procedimentos térmicos e de adição de Silício pode se obter uma reação eutetóide estável e obter uma matriz ferrítica.

² Reação de solidificação de uma fase líquida em duas sólidas. Chiaverini (2002).

³ Reação química de transformação de uma fase solida em duas solidas diferentes. Chiaverini (2002).

Anos depois foram desenvolvidos formas melhoradas dos ferros fundidos branco e cinzento, otimizando principalmente sua ductilidade, resistência e boa usinabilidade. Réaumur (1720) desenvolve uma forma de ferro fundido maleável, realizando um procedimento de tratamento térmico na fundição do ferro fundido branco, conhecido como maleabilização, convertendo a cementita em grafita. A grafita adquirida pelo procedimento se desenvolve em forma de agregados aproximadamente esféricos. Com ajuda deste procedimento, obtém-se então um ferro fundido mais dúctil e com uma capacidade de alongamento superior à 10%. Após este procedimento o material apresenta uma melhora significativa em suas propriedades mecânicas. Uma versão ainda melhor foi desenvolvida por Millis et al. (1949) conhecida como ferro fundido nodular. O ferro fundido nodular, também conhecido como ferro dúctil, possui os seus nódulos de grafita em forma de esferas compactas. Diferente do ferro cinzento, o ferro dúctil possui menos pontos de concentração de tensões na sua estrutura, pois os nódulos arredondados inibem a criação de trincas propagadoras de falhas. A característica anterior faz com que a ductilidade do material aumente consideravelmente, conseguindo assim superar o principal problema dos ferros fundidos e sua fragilidade. Guesser (2002) descreve no seu trabalho o processo de obtenção da grafita nodular em ferros fundidos; onde é usado Titânio em diferentes teores e combinado com Magnésio com a finalidade de impedir o crescimento de grafita em forma lamelar.

Na Figura 2.1 são apresentadas, em escala microscópica, as aparências superficiais destes quatro tipos básicos de ferros fundidos.

Dependendo do potencial de nucleação do líquido e a composição química, é determinado o potencial de grafitização do material. A Figura 2.2 mostra as microestruturas básicas e o processo de obtenção de ferros fundidos comuns. Quando o potencial de grafitização é elevado, se tem um ferro fundido com uma fase rica em carbono, mas quando o potencial é baixo os ferros possuem mais cementita (Fe_3C) devido a que quando a taxa de resfriamento é alta o tempo de nucleação e crescimento da grafita é reduzido.

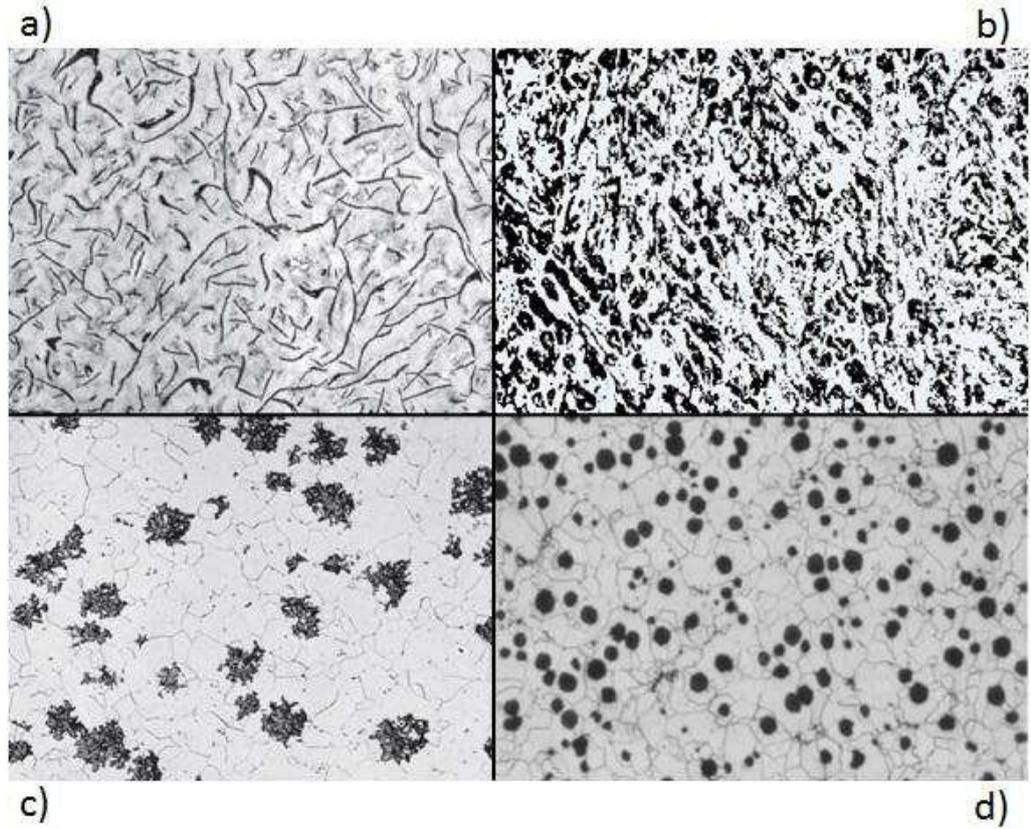


Figura 2.1 – Ferros fundidos: a) cinzento; b) branco; c) maleável; d) Nodular
 Fonte: Brown (2000), Dong et al. (1997)

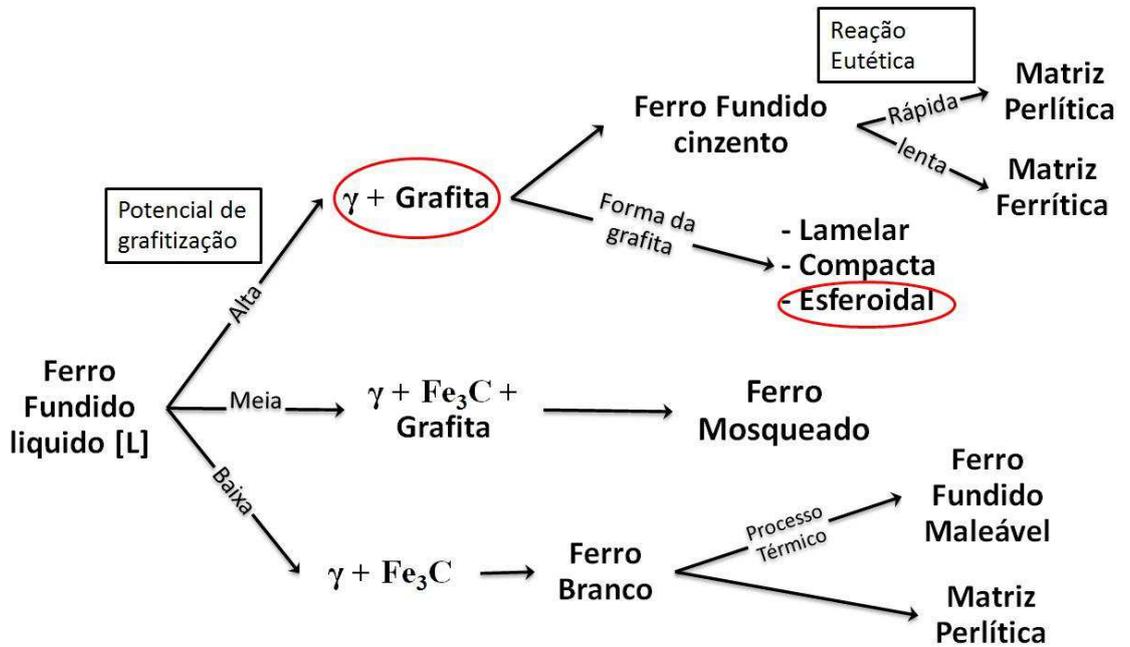


Figura 2.2 – Microestrutura básica e processo dos ferros fundidos comuns
 Fonte: Adaptado de Davis (1996)

A reação eutética estável e a eutética metaestável tem consequências diretas nas propriedades mecânicas. Assim, propriedades como a força, dureza, tenacidade, ductilidade, entre outros, dependerão em grande proporção da estrutura matricial do ferro fundido. Com os avanços na tecnologia e os avançados processos metalúrgicos conseguidos hoje em dia é possível então obter ferros fundidos com as propriedades mecânicas similares às desejadas.

Na Tabela 2.1 são listados os principais tipos de ferro fundido com suas respectivas fases predominantes de Carbono, sua matriz e o processo para a sua obtenção. Nesta tabela é complementada a classificação dos ferros fundidos, assim como as suas principais características.

Tabela 2.1 – Classificações de ferros fundidos, microestrutura e processo de obtenção.
Fonte: Adaptado de Davis (1996)

Denominação	Fase predominante	Matriz (*)	Processo de obtenção
Cinzento	Grafita lamelar	P	Solidificação
Branco	Cementita (Fe_3C)	P, M	Solidificação
Mosqueado	Grafita lamela + Fe_3C	P	Solidificação
Maleável	Grafita temperada	F, P	Tratamento Térmico
Nodular (Dúctil)	Grafita esferoidal	F, P, FP, A	Solidificação/Tto. Térmico

*F: Ferrítica, P: Perlítica, FP: Ferrítica-Perlítica, A: Austenita, M: Martensita.

Finalmente, e para efeitos práticos, vem se usando atualmente uma classificação mais simplificada dos ferros fundidos: branco, cinzento, maleável e dúctil (nodular). Estes são os tipos de ferros fundidos mais comercializados, sendo o nodular o tipo escolhido para finalidades de estudos no presente trabalho.

2.1.1.1 Ferro Fundido Nodular tipo GGG 40

Segundo Guesser (2002), a disposição da grafita no material está diretamente relacionada com a capacidade final de resistência do material e a sua ductilidade. O ferro fundido nodular, por exemplo, tem melhores propriedades mecânicas de resistência e ductilidade que as do ferro fundido cinzento.

No anexo um (1) são listados os diferentes tipos de ferros fundidos nodulares comuns comercializados atualmente e catalogados segundo as principais normas internacionais. Neste anexo também é exibido a sua composição química, principais propriedades mecânicas e microestrutura matricial.

O ferro fundido usado para o presente trabalho é conhecido como GGG 40 pela norma internacional DIN EN 1693, como 65.45.12 pela ASTM, como FE42012 pela norma brasileira e na ISSO 1083 como 400-15. A maioria destas normas usam os valores de resistência e alongamento esperados no material para a sua nomeação.

Ainda que alguns dos valores dos componentes químicos das ligas possam variar minimamente no seu valor, é mostrada na Tabela 2.2 a composição química do GGG 40 com os valores aproximados expostos por Zhang et al. (2016).

Tabela 2.2 - Composição química do Ferro Fundido Nodular tipo GGG 40.

Fonte: Zhang et al. (2016).

Elemento	Fe	C	Si	Mn	Cu	Ni	Mg	P	Cr	S
%	93,9	3,35	2,25	0,30	0,06	0,04	0,039	0,025	0,02	0,006

Segundo estas normas nacionais e internacionais, o ferro fundido GGG 40 possui uma matriz predominantemente ferrítica com um limite de resistência próximo aos 420 MPa e um alongamento de 12%. Uma descrição mais completa das principais propriedades mecânicas apresentadas por este tipo de ferro fundido é mostrada na Tabela 2.3 com ajuda das publicações de Chiaverini (2002), Brown (2000) e Zhang et al. (2016).

Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas do ferro fundido nodular GGG 40.

Fonte: Chiaverini (2002), Brown (2000) e Zhang et al. (2016).

Propriedade Mecânica	
Módulo de elasticidade [GPa]	160 - 185
Coefficiente de Poisson	0,28 - 0,30
Limite de resistência à tração [MPa]	420 - 445
Alongamento Percentual	12 - 15
Dureza	HB 150-200

2.1.2 Materiais Poliméricos

Os materiais polímeros são sólidos conformados por múltiplas unidades entrelaçadas quimicamente. Assim, as macromoléculas que conformam o polímero são unidas por monômeros mediante enlaces covalentes. Como explica López (2014), os polímeros são a união de pequenas moléculas (conhecidas como monômios), mediante um processo químico conhecido como reação de polimerização, e que forma uma estrutura repetitiva.

Os materiais poliméricos fazem parte da classificação primária dos materiais sólidos. A estrutura dos polímeros não possui uma configuração cristalina em todo o material, pelo qual a sua resistência e ductilidade são menores que materiais com estruturas cristalinas como os metais em geral.

Os polímeros em geral foram desde séculos atrás um material com um consumo acelerado. Segundo Smith e Hashemi (2006), polímeros como os plásticos apresentaram um crescimento anual ao redor de nove por cento (9%) durante vários anos.

Antes da civilização já eram usados alguns polímeros de origem natural. Lopez (2004) explica, por exemplo, como antes da chegada de Cristóvão Colombo em 1492 à América os mexicanos já usavam o algodão. Os polímeros podem ser classificados em três tipos principais: plásticos, borrachas e fibras. Pelo material que será trabalhado neste trabalho ser do tipo plástico, o foco desta seção será centrado neste tipo de polímeros.

Os plásticos também possuem uma classificação interna que os divide segundo a sua capacidade de deformação dependendo da temperatura. Os termoplásticos são aqueles polímeros que com o aquecimento viram mais flexíveis e endurecem em temperaturas mais baixas. Os termorrígidos, por outro lado, são aqueles polímeros do tipo plástico que não experimentam alteração na sua rigidez com a mudança de temperatura.

Segundo as classificações mencionadas, o material polimérico estudado no presente trabalho é do tipo plástico que sofre alteração com a mudança de temperaturas, ou seja, um termoplástico.

2.1.2.1 Poliestireno (PS)

Segundo Alberola et al. (2014) o poliestireno foi desenvolvido inicialmente na Alemanha pela indústria I. G. Faberindustrie e a partir deste momento só vem aumentando a sua produção para diferentes aplicações.

O preço relativamente econômico deste material faz com que seja uma alternativa atraente para muitas aplicações. A Ecoplas (2011) descreve algumas aplicações na engenharia para este polímero, como são carcaças de televisores, computadores e impressoras, peças de carros e aviões, entre muitas outras.

O PS é obtido a partir do processo de polimerização do estireno. Assim, o etilbenzeno é esquentado com um catalizador até obter o estireno, o qual depois é polimerizado.

Segundo Grassi et al. (2001) o PS em uma temperatura ambiente é de caráter vítreo e possui uma baixa absorção ao impacto, por isto é comum usar o poliestireno como base de um material compósito onde possa ser melhorada está propriedade.

O PS pode ser apresentado em quatro tipos principais explicados em Ecoplas (2011), onde o PS cristal corresponde ao estado puro, obtido diretamente do estireno puro. Um segundo tipo é o PS de alto impacto, onde é adicionada borracha em uma proporção de 14% com a finalidade de melhorar a sua resistência mecânica. O poliestireno expandido (EPS), por outro lado, contém 95% de poliestireno e o restante de material gasoso, geralmente pentano encarregado de reduzir a densidade do material. Uma última apresentação do PS é o espumado, que diferente do expandido, por possuir bolhas fechadas de gás injetado, conserva as propriedades isolantes ainda depois de molhado.

2.1.2.2 Compósito com matriz de Poliestireno

A possibilidade de realizar materiais compósitos trouxe vantagens incríveis para a engenharia, pois com isto foi possível aumentar o catálogo de materiais disponíveis para responder perante solicitações de carga dos projetos. A importância dos compósitos deriva da possibilidade de obter um material com propriedades mecânicas únicas e melhoradas, que talvez um material não consiga satisfazer por si só.

A utilidade dos materiais compósitos também pode ser avaliada desde o ponto de vista econômico, onde a combinação dos materiais não implique um custo maior, mas sim otimizar a relação custo-benefício.

Os compósitos podem estar conformados por dois ou mais materiais que são ligados de alguma forma de maneira a resultar um material apenas. O material aglomerante é conhecido normalmente como matriz, e o material adicionado é conhecido como reforço, pois a sua função é a de reforçar algumas propriedades.

Existem materiais compósitos de diversos tipos, segundo Smith e Hashemi (2006) entre os tipos de compósitos mais predominantes se encontram os fibrosos e os particulados, onde a matriz é reforçada com fibras normalmente naturais e partículas, respectivamente.

Aqueles compósitos que possuem uma matriz polimérica são identificados internacionalmente com as suas siglas em inglês PMC.

Servem como base para este trabalho artigos onde foram caracterizados compósitos do tipo PMC. Borsoi et al. (2011) realiza um trabalho similar ao desenvolvido no presente trabalho, onde obteve também a caracterização de um compósito de PS reforçado com fibra de algodão. Por outro lado, Poletto et al. (2010) realiza um trabalho com as mesmas características e onde, novamente, o único que muda na caracterização do material é o tipo do reforço, utilizando serragem de *Pinus Elliottii*. Em vez destes tipos de reforços, este trabalho utiliza fibras de celulose de bagaço de cana-de-açúcar para adicionar à matriz polimérica, sendo um recurso mais econômico.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS VIA ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos são a via principal para obter as propriedades mecânicas de um material e realizar a caracterização mecânica dele. Segundo Nan, Xing e Bao (2013), as propriedades mecânicas dos materiais dependem em grande medida dos métodos de fabricação, por isto não necessariamente um material com a composição química correta apresenta as características desejadas. É importante então realizar ensaios mecânicos nos materiais para garantir que as propriedades do material com o qual vai se trabalhar sejam as esperadas.

É por via dos ensaios mecânicos então, que um cientista ou engenheiro, que tem por finalidade o uso de algum material, realiza a caracterização mecânica levantando as suas principais propriedades mecânicas de forma quantitativa e/ou qualitativa ante os diferentes tipos de esforço solicitados.

Segundo Souza (1982) esses ensaios podem ser destrutivos ou não destrutivos, dependendo se o material for levado até a ruptura ou pelo contrário sendo possível ainda sua utilização após o teste. Ensaio como tração, fadiga, impacto, entre outros são ensaios destrutivos, onde os corpos de prova são inutilizáveis após o teste. Há também os ensaios não destrutivos onde geralmente o procedimento é realizado em peças acabadas, as quais não podem ser danificadas. Como exemplos deste tipo de ensaios pode-se citar raios x, ultrassom, líquidos semelhantes, entre outros.

Cada vez pretende-se padronizar mais os ensaios mecânicos sobre os materiais, é por isto que através do tempo foram elaboradas normas que descrevem os procedimentos e materiais aconselháveis nos diferentes ensaios mecânicos. A aplicação destas normas nos trabalhos faz com que possam ser replicadas experiências em trabalhos independentes. Internacionalmente as normas mais usadas para ensaios mecânicos são as elaboradas pela ASTM (American Society for Testing and Materials), a DIN (Deutsches institut für normung) e ISO (International Organization for Standardization). No presente trabalho foram usadas algumas normas das duas primeiras entidades mencionadas.

A lista de ensaios que podem ser usados para caracterizar um material pode ser ampla ou não, dependendo da finalidade da avaliação do material e os seus fins. Sjögren et al. (2011), por exemplo, comparou algumas propriedades mecânicas de diferentes classes de ferros fundidos nodulares por meio de ensaio de tração combinado com técnica de correlação digital de imagem. Posteriormente, Çetinarslan e Karaman (2014) realizam um estudo similar sobre este material avaliando a influência da espessura nas propriedades mecânicas deste.

Cada ensaio realizado no presente trabalho para caracterizar o material inicia então com uma abordagem nos seus conceitos gerais, no capítulo três (3), com a finalidade de agrupar todo o concernente a cada ensaio e facilitar ao leitor o entendimento dos procedimentos e resultados.

2.3 SISTEMA DE CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM (CDI)

A pesar de ser uma técnica relativamente moderna, a correlação digital de imagem (CDI) cada vez é mais amplamente utilizada no campo dos ensaios mecânicos de materiais, pois a partir desta pode-se obter o campo de deslocamentos e deformações de um material exposto a esforços.

O princípio básico da CDI consiste em comparar fotografias sequenciais adquiridas e analisar nelas as variações de movimento da superfície avaliada de uma para a seguinte, tendo como base um padrão de pontos desenhado na superfície de análise.

A técnica de CDI só começou a ser desenvolvida nos finais do século XX com uma primeira aproximação feita por Peter e Ranson (1982) onde começaram a desenvolver uma técnica que conseguia avaliar os deslocamentos de um padrão de pontos na superfície do material e criar depois o campo de deslocamentos deste. Uma evolução desta técnica foi apresentada pouco tempo depois por Sutton et al. (1983) e Chu et al. (1985), criando métodos mais automatizados e conceitos mais consolidados do sistema.

Apesar destas grandes contribuições, os recentes progressos na tecnologia computacional e a fotografia digital fez com que somente nos tempos atuais fosse utilizada amplamente esta técnica com procedimentos cada vez mais padronizados e automatizados. Lecompte et al. (2006), Pan et al. (2009) e Schreier et al. (2000) são grandes contribuintes ao desenvolvimento desta técnica nos últimos anos, desenvolvendo até manuais que expõem os procedimentos aconselháveis e princípios básicos nas medições das propriedades obtidas pelo sistema de CDI.

O sistema de CDI consiste em três passos gerais; o primeiro deles incide na preparação da amostra de material que vai sofrer a deformação, elaborando um padrão de pontos na superfície com uma distribuição aleatória que o sistema tenha a capacidade de reconhecer. O segundo passo consiste na aquisição das fotografias, tendo em conta que deve se ter uma imagem inicial de referência quando o corpo ainda não experimentou nenhum tipo de deformação; depois desta fotografia de referência, as seguintes fotos são obtidas sequencialmente dependendo da frequência desejada. Uma vez que as fotografias são obtidas, realiza-se o cálculo

dos deslocamentos para os pontos da superfície, de onde finalmente são obtidos os campos de deslocamento e deformações.

Como afirma Pan et al. (2008) para o primeiro passo, a qualidade do padrão de pontos desenhados sobre a superfície do corpo de prova está diretamente relacionada com a qualidade dos cálculos realizados pelo sistema. Assim, é inevitável não introduzir uma margem de erro aos dados obtidos devido ao desenho dos pontos. Lecompte et al. (2006) atribui parte do erro também ao tamanho dos pontos, recomendando na sua publicação evitar no padrão de pontos tamanhos muito grandes ou, pelo contrário, muito pequenos.

Vários autores já apresentaram uma grande quantidade de metodologias para criação dos padrões de pontos, passando desde o uso de tinta spray dispersado na amostra até métodos computacionais com um maior controle do desenho. Barranger et al. (2010) compara no seu trabalho três métodos diferentes de criação de pontos sobre uma superfície de maneira manual onde há uma dificuldade de controle sobre o tamanho e o comportamento aleatório dos pontos. Já Mazzoleni (2015) propõe uma aplicação dos pontos gerados computacionalmente, com uma aleatoriedade mais controlada, porém esta técnica apresenta a dificuldade de ser aplicada em superfícies circulares e demanda tempo.

O segundo passo é o mais simples nos tempos atuais devido à chegada das câmeras digitais, onde as resoluções permitem fotografias de alta qualidade e precisão. Neste caso, o procedimento consiste em uma metodologia de acoplamento do tempo da aquisição das fotografias com a aplicação do esforço no material, com objetivo de relacionar cada campo de deslocamento ou deformação a um tempo determinado da aplicação da respectiva força aplicada no material.

Após os dois primeiros passos cumpridos; ter desenhado o padrão de pontos na amostra e adquirido as fotos de referência e deformadas, é necessário criar uma malha uniforme dividindo os pontos desenhados em subconjuntos (Figura 2.3). Sobre estes subconjuntos é realizada uma análise do deslocamento do ponto central do subconjunto e calculada posteriormente a deformação de cada sub-região.

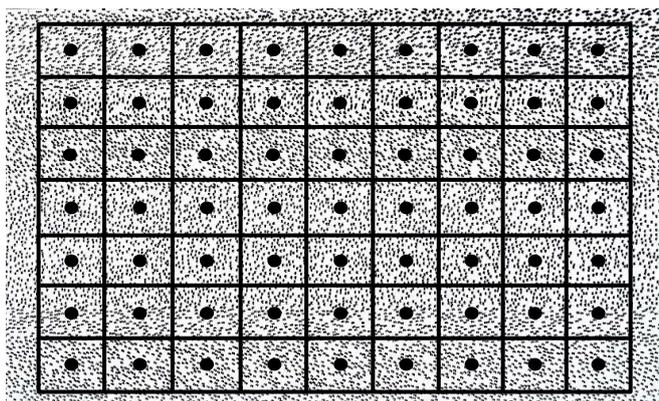


Figura 2.3 - Superfície com padrão de pontos e malha uniforme.
 Fonte: Oberg (2016)

O cálculo do deslocamento de cada ponto central do subconjunto é realizado com base nas componentes do vetor de deslocamento, conforme mostrado na Figura 2.4, onde P representa o ponto central do subconjunto e P' representa a nova localização deste ponto depois da deformação.

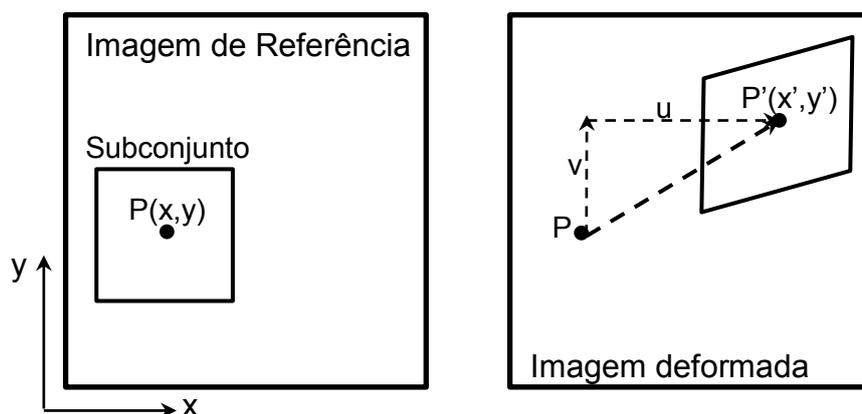


Figura 2.4 - Análise de um subconjunto da superfície antes e depois da deformação
 Fonte: Adaptado de Colabella (2011)

Como mostra a Figura 2.4, o deslocamento do ponto P pode ser obtido se são calculadas as componentes do vetor deslocamento (u e v) com base nas coordenadas cartesianas dos respectivos pontos P e P' e com as Equações 2.2.

$$u = x' - x \quad v = y' - y \quad (2.2)$$

Por isto, o objetivo dos sistemas de CDI consiste em localizar nas imagens seguintes os pontos físicos equivalentes à imagem de referência e encontrar as componentes do vetor de deslocamento. Uma vez realizados os três passos no

sistema podem ser obtidos os campos de deslocamento e deformação para toda a superfície analisada do material e para cada instante no qual foi adquirida uma imagem diferente.

Um das principais utilidades dos sistemas de CDI é a fácil obtenção do coeficiente de Poisson dos materiais, pois como apresentado na seção anterior, esta propriedade dos materiais é calculada em termos das suas deformações.

Existem atualmente sistemas de CDI completos que contém o hardware e software para adquirir e processar totalmente as imagens deformadas. A Figura 2.5 ilustra o CDI desenvolvido pela DANTEC Dynamics, o qual é composto por duas câmeras de alta resolução, um sistema HILIS de iluminação de luz LED fria e os seus devidos suportes, assim como um software (ISTRA 4D) capaz de processar todas as fotografias adquiridas e devolver como resultado os campos de deslocamento e deformações do material avaliado. Frankovský et al. (2013) faz uso deste sistema para analisar as deformações apresentadas em um material fotoelástico quando submetido a esforços. Este trabalho será usado como referência para a realização dos ensaios, pois o equipamento CDI é do mesmo modelo.



Figura 2.5 – Sistema de CDI Q-400 da empresa DANTEC Dynamics.

Fonte: DANTEC (2002)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho pretende-se avaliar algumas das características de resistência de dois tipos de materiais de comportamentos diferentes: um ferro fundido nodular do tipo GGG 40 e um poliestireno reforçado com fibras de celulose de bagaço de cana-de-açúcar. Serão expostos os procedimentos de diferentes ensaios realizados sobre amostras dos materiais.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a realização dos ensaios sobre ferro fundido nodular do tipo GGG 40 foram usados dois lotes do material. Ambos os lotes foram adquiridos da fundição Metalrens do município de Extrema em Minas Gerais. Um primeiro lote do material foi fundido em forma de cubos de material com medidas de 100 mm por cada lado. Os ensaios de MEV, TGA, dureza, impacto e tração usando extensômetro, foram realizados com este primeiro lote de material. Um segundo lote do mesmo material foi solicitado em forma de cilindros com 220 mm de comprimento e um diâmetro de 20 mm para realizar os ensaios de tração usando CDI.

No caso do material polimérico, o material é obtido como resultado do trabalho experimental da dissertação de mestrado elaborada por Correia de Jesus (2014). Neste trabalho é explicado de forma detalhada o procedimento para a obtenção do material. De forma resumida, foi colhida inicialmente uma grande quantidade de (EPS), mais conhecido comercialmente como isopor, pós-consumo ou reciclado. O EPS foi comprimido em uma prensa hidráulica a uma temperatura perto da temperatura de fusão, 130 °C, com uma pressão de oito toneladas durante três minutos com a finalidade de aumentar a sua densidade. Obtém-se uma placa mais rígida que é triturada em um liquidificador industrial até virar pó. Esta tritura obtida do material é colocada em uma extrusora mono-rosca com a finalidade de misturar a matriz polimérica com o reforço de fibras de celulose e depois em uma extrusora duplo-rosca para obter um material mais homogêneo. Os estados do material após cada processo podem ser observados a continuação na Figura 3.1, onde a) é o poliestireno expandido obtido do pós-consumo, b) representa este material depois de ser prensado, aumentando a sua densidade. O PS reciclado

triturado pode ser observado em c) e finalmente d) é o resultado da obtenção do PS depois da extrusão.



Figura 3.1 – Processos do material para obtenção do PS: a) EPS reciclado, b) Material após prensado, c) PS triturado, d) PS depois da extrusão.

Fonte: Correia de Jesus (2014)

Parte do material foi reforçada com fibras de celulose de bagaço de cana-de-açúcar com a finalidade de observar a sua melhoria nas propriedades mecânicas. Para a obtenção da fibra de celulose do bagaço de cana foi adicionado solução de NaOH 25% m/v (19,37% de Na₂O ativo) obedecendo à relação licor: bagaço de 6:1 (v/m), e 0,15% (m/v) de antraquinona em relação ao volume total do licor. As fibras foram exaustivamente lavadas com água até ter um pH neutro e posteriormente foram secadas a temperatura ambiente. O procedimento anterior se realiza com o objetivo de retirar a parte amorfa do material e separar a celulose exclusivamente, porém aproximadamente um resíduo de 7% de lignina é deixado com a finalidade de melhorar a interação entre as fibras de celulose e a matriz de PS. A relação da composição do compósito de PS reciclado e celulose de bagaço de cana-de-açúcar foram de 20% em massa de fibra de celulósica de bagaço de cana.

Após realizar a extrusão do material, este pode ser injetado em moldes com o formato dos corpos de prova desejados para a realização de ensaios.

3.2 ENSAIOS UTILIZADOS

A caracterização de um material tem como principal objetivo avaliar o seu desempenho perante possíveis solicitações de esforço. Esse desempenho será avaliado no presente trabalho por meio de diferentes ensaios mecânicos que revelaram as principais propriedades mecânicas do material.

No entanto, antes de qualquer teste mecânico, é importante ter um conhecimento básico do material em outros aspectos para obter o maior proveito das suas possíveis aplicações. Por outro lado, faz-se importante prever falhas indesejáveis que podem ser determinadas ou previstas com alguns tipos de ensaios. Se estudou a composição química de uma amostra do material por meio de uma análise da superfície via microscópio eletrônico de varredura (MEV). Também foi realizada uma análise térmica com a finalidade de observar a variação de massa do material com o aumento da temperatura.

3.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica utilizada para determinar a composição química do material usando um feixe de elétrons sobre a superfície de uma amostra.

Como explicam Dedavid et al. (2007) depois de que o feixe faz interação com a amostra, são produzidos elétrons e fótons que são analisados por detectores do sistema e são usados para construir as imagens sendo focalizados por campos eletromagnéticos ou eletrostáticos. Cada elemento da tabela periódica emite uma radiação com um comprimento diferente de onda depois de ser atacado pelo feixe de elétrons; a microanálise consiste então em identificar os tipos de elementos pertencentes à região avaliada medindo esses raios-X.

Para obter uma ótima identificação da composição química da amostra, é necessário que esta tenha um tratamento adequado para que possa ser feita uma análise com uma profundidade apropriada, como descreve Kestemnbach e Bota

Filho (1994), onde explica que a amostra deve ser lixada seguindo uma sequência de lixas com grãos cada vez mais finos até usar finalmente panos impregnados de abrasivos para polir a peça. Dedavid et al. (2007) recomendam também usar lixas do tipo d'água para amostras metálicas, de maneira que o lixamento seja realizado com presença constante de água em fluxo com a intenção de evitar contaminações indesejadas na amostra.

Foi utilizado um analisador MEV modelo JEOL JSM 6610 do Laboratório de Ensaio Mecânicos SG-9 localizado no Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília (UnB).

Foi preparada a amostra lixando um pequeno bloco do material GGG 40, com dimensões de 12x10x6 mm, usando em sequência lixas d'água com granulometrias de 100, 220, 400, 600 e 1200. Foi usada para este fim uma lixadeira motorizada com fluxo constante de água corrente sobre a amostra.

Após o lixamento, foi realizado um polimento da amostra usando um tecido de poliéster com pasta de diamante de um (1) micrômetro para obter uma superfície com rugosidade mínima e limpa. Uma vez que a superfície da amostra se atinge em boas condições de análise, deve-se evitar qualquer tipo de umidade para a realização da análise.

3.2.2 Análise Termogravimétrica (TGA)

Como descreve Haines (1995), o princípio da análise termogravimétrica consiste em avaliar a variação de massa que experimenta uma amostra de material quando é exposta a mudanças de temperatura por um período de tempo e ambiente controlados. A análise termogravimétrica (TGA) é um ensaio que está dentro da categoria de análises térmicas, onde a variável principal é a temperatura.

O ensaio de TGA é um ensaio destrutivo que normalmente requer amostras de tamanho minúsculo colocadas em um cadinho feito de material inerte. Além do cadinho para depositar a amostra enquanto o teste é feito, o sistema possui uma balança de precisão que é a encarregada de monitorar constantemente a massa do material. O forno e os termopares também compõem a análise acompanhada normalmente de um sistema de passagem dos gases que são gerados pelas altas temperaturas atingindo a amostra, como descreve PerkinElmer (2010).

Skoog, Holler e Nieman (2001) explicam os procedimentos adotados para elaborar a análise TGA de um material. A pequena amostra é colocada no cadinho inerte o qual possui um suporte ligado na balança de precisão que proporcionam informação quantitativa para amostras de até 100 mg de massa. Uma vez iniciado o teste, é controlada a velocidade do aumento gradual de temperatura e é usado algum sistema de controle atmosférico para evitar que os gases presentes no teste possam reagir com a amostra mudando as propriedades do material. Normalmente para metais são usados ambientes com Nitrogênio ou Árgon com a finalidade de evitar a oxidação da amostra e os efeitos que isso teria sobre a variação da massa.

Foi usada para o ensaio uma amostra do material GGG 40 com uma massa inicial de 59,119 mg, a qual foi previamente lixada e polida com a finalidade de tirar qualquer tipo de contaminação ou oxidação presente que pudesse apresentar alguma perturbação na variação real de massa do material com o aumento da temperatura.

Para realizar o teste de TGA foi usado um analisador térmico da companhia TA Instruments modelo SDT Q600, localizado no campus de Gama da UnB, representado na Figura 3.2.



Figura 3.2 – Analisador térmico SDT Q600 da TA Instruments.

Foi usado um cadinho de alumina inerte com a finalidade de evitar a reação deste com o material a ser analisado, o cadinho tem uma capacidade de 90 μL e foi previamente limpo com acetona (Figura 3.3).



Figura 3.3 – Cadinho de alumina na análise de TGA.

O GGG 40, por ser um ferro fundido, tem uma alta e rápida tendência à oxidação, por esta razão o sistema de controle atmosférico utilizado no teste foi de nitrogênio, usando um fluxo de 50 ml/min injetados automaticamente pelo equipamento.

Segundo as especificações sobre o sistema da TA Instruments (2010), o equipamento usado tem um intervalo de temperatura que varia desde a temperatura ambiente até os 1500°C, o teste para o material trabalhado foi feito usando valores crescentes de temperatura desde a do ambiente (21,5°C) até os 1400°C aproximadamente. Foi usada uma taxa de aumento da temperatura de 10°C/min.

3.2.3 Ensaio de Impacto

Com o teste de impacto é possível avaliar a capacidade do material para absorver a energia provocada pela colisão de outro corpo, em outras palavras, com este ensaio pode-se medir a quantidade de energia que foi usada para deformar e romper um corpo de prova padronizado.

Para materiais metálicos é amplamente usado o ensaio de impacto tipo Charpy, onde o princípio de medição é bastante simples. Como explicam Askeland et al. (2012), é usado um sistema com um pêndulo de alto peso que se deixa cair desde uma altura conhecida (H_0), como se pode observar na Figura 3.4. Na parte mais baixa o pêndulo impacta com o corpo de prova padronizado onde perde

energia pelo impacto. Finalmente, é medida a altura final do pêndulo (H_f) e com a diferença entre a altura inicial e esta altura final pode ser determinada a energia potencial, que obedece à energia de impacto que o material testado absorveu até romper.

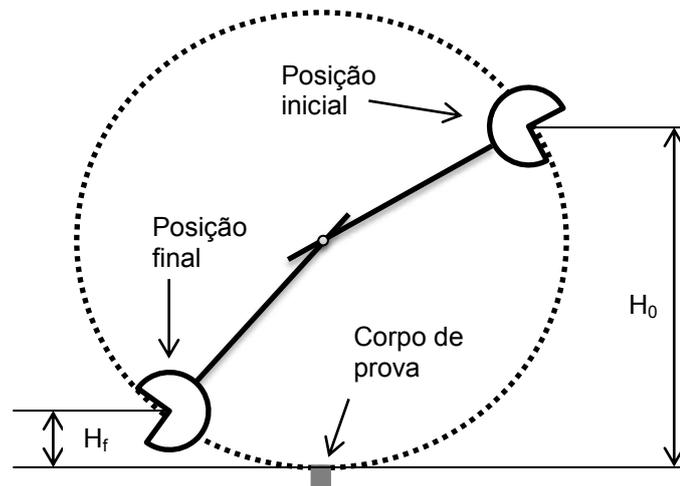


Figura 3.4 – Sistema Charpy para ensaio de Impacto.
Fonte: Adaptado de Askeland et al. (2012)

A norma internacional ASTM E23 (2012) estabelece procedimentos padrões e as recomendações sobre as dimensões das amostras com o fim de padronizar o teste para materiais metálicos. Esta norma fornece também uma guia para identificar o tipo de fratura sofrida pelo corpo de prova, sendo esta de caráter dúctil ou frágil, dependendo da aparência das faces onde aconteceu o rompimento, como se pode observar na Figura 3.5. Neste sentido, uma fratura frágil mostra uma superfície sem muitas deformações significativas e uma estrutura mais regular, como as mostradas na esquerda da imagem. Uma deformação mais plástica ou com mais irregularidades, como as mostradas na direita da Figura 3.5, mostram uma fratura mais dúctil do material.

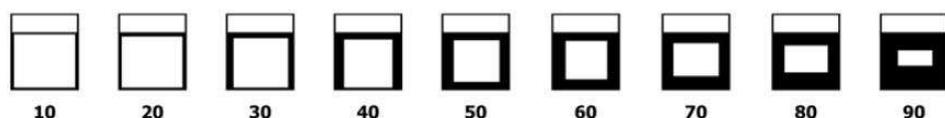


Figura 3.5 – Guia de aparência da fratura do corpo de prova.
Fonte: ASTM E23 (2012)

Alguns materiais podem mudar seu comportamento de fratura de dúctil a frágil dependendo da sua temperatura. Segundo Askeland, Fulay e Wright (2012), a temperatura onde o material passa de ter um comportamento dúctil para um comportamento frágil é conhecida como temperatura de transição. Assim, essa temperatura pode ser determinada como a média entre as duas regiões; frágil e dúctil, conhecida como zona de transição e mostrada na Figura 3.6.

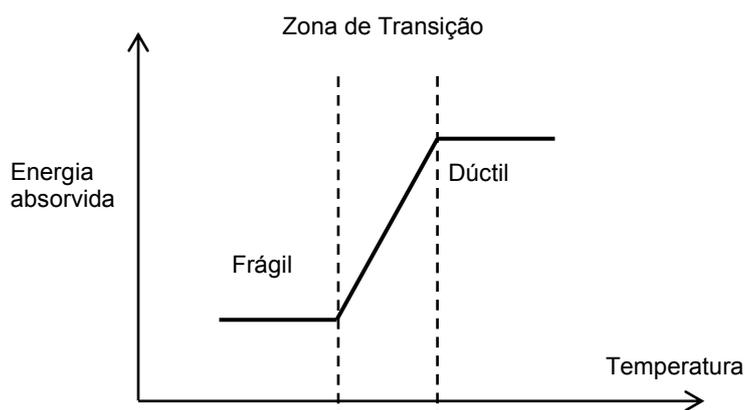


Figura 3.6 – Gráfico de resistência ao impacto para diferentes temperaturas.

Na prática, são feitos vários ensaios de impacto mudando em alguns °C a temperatura do material, até obter os dados suficientes para observar uma tendência do comportamento. No entanto, nem todos os materiais evidenciam uma temperatura ou região de transição muito claramente e são normalmente aqueles metais que possuem geralmente uma absorção maior de energia.

A norma internacional ASTM E23 (2012) explica em detalhe as características e os métodos para realizar o ensaio de impacto. É de grande importância definir as dimensões e características que deve ter as amostras que vão ser ensaiadas. Na Figura 3.7 mostra-se a configuração e a dimensão mais comum dos corpos de prova usados para o teste de impacto tipo Charpy, sendo também o tipo de corpo de prova usado no presente trabalho.

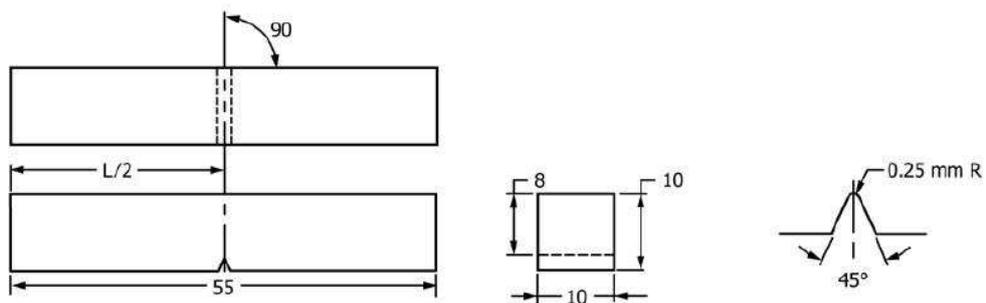


Figura 3.7 – Medidas do corpo de prova para o teste de impacto.

Fonte: ASTM E23 (2012)

Como pode ser observado na Figura 3.8, foram preparados um total de 20 corpos de prova do material GGG 40 a diferentes temperaturas, seguindo a configuração anterior, onde nove (9) deles foram esfriados usando um recipiente com nitrogênio líquido antes de ser ensaiados e outras nove (9) amostras foram aquecidas em um forno até alcançar uma temperatura superior a 250°C. Finalmente, duas (2) amostras foram deixadas a temperatura ambiente para completar o intervalo desejado de temperaturas. As amostras nas quais foi alterada a temperatura ambiente foram deixadas depois sobre uma atmosfera natural até apresentar a temperatura desejada no teste, medindo esta por meio de uma câmera térmica. Foram usadas diferentes temperaturas para a realização dos testes com o fim de obter a transição de comportamento no material.



Figura 3.8 – Corpos de prova de GGG 40 antes do ensaio de impacto.

A câmera térmica utilizada para a medição da temperatura dos corpos de prova é modelo Fluke Ti125, e possui uma faixa de medição de temperatura de

415°C, medindo entre os valores de -30°C e os 385°C. O anterior restringe a faixa da temperatura das amostras ensaiadas para dentro desses valores.

O procedimento para atingir os valores exatos de temperatura desejados nos testes de impacto consistiu, no caso das temperaturas elevadas, em aquecer o corpo de prova até uma temperatura um pouco maior que a estabelecida e era posicionado no aparelho de impacto Charpy pronto para ser fraturado, assim, ia se monitorando com a câmera térmica até a temperatura descer naturalmente e atingir o valor desejado, nesse momento era liberada a carga e realizado o ensaio. De forma similar foi realizado o procedimento dos corpos de prova com temperaturas abaixo da temperatura ambiente, onde a ideia era deixar as amostras com uma temperatura menor à desejada, de forma que atingissem de forma natural a temperatura desejada para a realização do teste.

3.2.4 Ensaio de Dureza

De modo geral, como é expresso por Smith e Hashemi (2006), o ensaio de dureza mede a resistência que um material exerce ao ser penetrado por outro objeto de alta dureza.

Além do ensaio de tração, o ensaio de dureza é um dos mais utilizados para a previsão e o controle da qualidade dos materiais, Santos et al. (2001) explicam a importância do ensaio de dureza argumentando a dureza como função da condição da superfície do material e prever um comportamento desta superfície ante algumas solicitações de carga.

O ensaio de dureza é um ensaio geralmente não destrutivo, como expõe Smith e Hashemi (2006), a marca deixada pela endentação do equipamento penetrando o material não impede a sua reutilização na maioria dos casos.

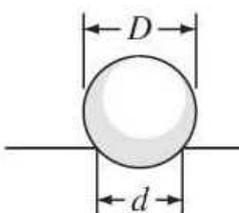
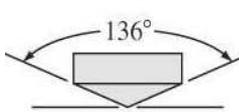
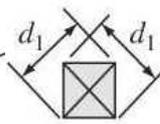
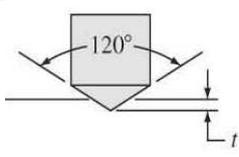
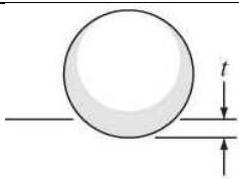
Existem vários tipos de ensaios de dureza, mas a maioria deles tem o mesmo princípio de procedimento, onde algum tipo de penetrador de material duro é usado para realizar alguma deformação no material. O tipo de penetrador, como expressam Rodriguez e Martins (2005) no seu livro, pode variar dependendo do tipo de ensaio, sendo possível usar do tipo esférico, cônico ou piramidal. Os penetradores podem variar também o tipo de material com o qual são feitos, normalmente são feitos de aço temperado ou Carboneto de tungstênio.

Os ensaios de dureza mais conhecidos são o ensaio Brinell, Rockwell e Vickers, depois de obter o valor da dureza com algum desses métodos é possível realizar a conversão para qualquer dos outros tipos de dureza. Na Tabela 3.1 é mostrado para cada tipo de ensaio de dureza o tipo de penetrador assim como a fórmula que deve ser usada para a obtenção do valor da dureza.

Na equação correspondente à dureza Brinell (Eq. (3.1)), o valor de P corresponde ao valor da carga aplicada em quilogramas (kg), D ao diâmetro do penetrador e d é a medida do diâmetro da marca deixado após terminar o teste, ambos os diâmetros em milímetros (mm). A Eq. (3.2) que mostra a fórmula para calcular a dureza Vickers depois de ser realizado o teste tem a variável P que corresponde à carga utilizada e d_1 é a medida da diagonal deixada pelo indentador em forma de diamante. Finalmente as equações da dureza Rockwell (Eq. (3.3) e (3.4)) possuem só a variável t que representa a profundidade alcançada pelo penetrador.

Tabela 3.1 – Tipos de ensaios de dureza e penetradores.

Fonte: Adaptada de Hayden et al. (1965)

Ensaio	Penetrador	Forma do penetrador		Carga	Fórmula da dureza
		Lateral	Superior		
Brinell	Esfera de 10 mm. De aço ou Carboneto de tungstênio.			P	$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$ (3.1)
Vickers	Pirâmide de Diamante			P	$VHN = \frac{1.72P}{d_1^2}$ (3.2)
Rockwell	Cônico de Diamante			60 kg	$\left. \begin{matrix} HR_A = \\ HR_C = \\ HR_D = \end{matrix} \right\} 100 - \frac{t}{0,002}$ (3.3)
				150 kg	
$\left. \begin{matrix} A \\ C \\ D \end{matrix} \right\}$					
$\left. \begin{matrix} B \\ F \\ G \end{matrix} \right\}$	Esfera de aço (1/16 poleg.)			100 kg	$\left. \begin{matrix} HR_B = \\ HR_F = \\ HR_G = \\ HR_E = \end{matrix} \right\} 130 - \frac{t}{0,002}$ (3.4)
	Esfera de aço (1/8 poleg.)			60 kg	
$\left. \begin{matrix} E \end{matrix} \right\}$					

O tipo de ensaio que deve ser escolhido para avaliar a dureza depende do tipo de material que vai ser ensaiado e a dureza esperada, por exemplo, segundo Santos et al. (2001), as cargas e os penetradores do ensaio Rockwell são menores que os do ensaio de dureza Brinell pelo qual pode-se deduzir que materiais mais brandos podem ser testados com ensaios de dureza tipo Rockwell.

O tipo de penetrador escolhido também depende da dureza que se presume o material vai apresentar, assim, um penetrador com ponta de diamante pode penetrar materiais com uma dureza maior que os materiais que o indentador esférico conseguiria penetrar.

O procedimento para realizar o ensaio de dureza, como é explicado na norma internacional ASTM E10 (2012) para dureza Brinell e ASTM E18 (2015) para dureza Rockwell, começa sempre com o preparo da amostra, que ainda que não exija um padrão estabelecido de corpo de prova, recomenda cuidados básicos com a espessura (suficiente para o penetrador não atravessar a amostra), com o lixamento e polimento da amostra para que possam ser claramente identificáveis as marcas do penetrador nos casos onde precisam ser feitas as medições das marcas.

A Figura 3.9 mostra o equipamento usado para realizar o teste de dureza. O durômetro Durotwin – D Plus série 963 da empresa Mitutoyo foi usado para realizar o ensaio de dureza Rockwell no Laboratório de Materiais localizado no campus de Gama da UnB. No equipamento pode ser identificada a pequena plataforma para a amostra e na parte superior o penetrador, que pode ser do tipo esférico ou de diamante cuja fixação é por meio de um ímã na peça.

O procedimento para realizar o ensaio de dureza Rockwell é simples e tem a vantagem de que não precisa de uso de fórmula para obter o resultado, pois é conseguido diretamente do painel no aparelho e com base no incremento da profundidade atingida pelo penetrador.



Figura 3.9 – Durômetro Durotwin – D Plus da empresa Mitutoyo.

Ainda que a norma internacional ASTM E18 (2015) não recomenda algum tipo de medidas específicas para a amostra, vale a pena registrar que o corpo de prova foi um paralelepípedo de ferro fundido nodular GGG 40 com medidas de comprimento e largura de 29 mm e uma espessura de oito (8) mm. As duas faces maiores da amostra foram devidamente lixadas com um processo de limpeza de rugosidades progressivo, assim, foram usadas sequencialmente lixas d'água número 100, 220, 400, 600 e 1200. O corpo de prova foi submetido a um processo de polimento final com um tecido de poliéster (Figura 3.10(b)) na politriz Polipan 2D da empresa Pantec mostrada na Figura 3.10(a) usando pasta de diamante de um (1) micrômetro até obter nas duas faces maiores uma superfície totalmente lisa.

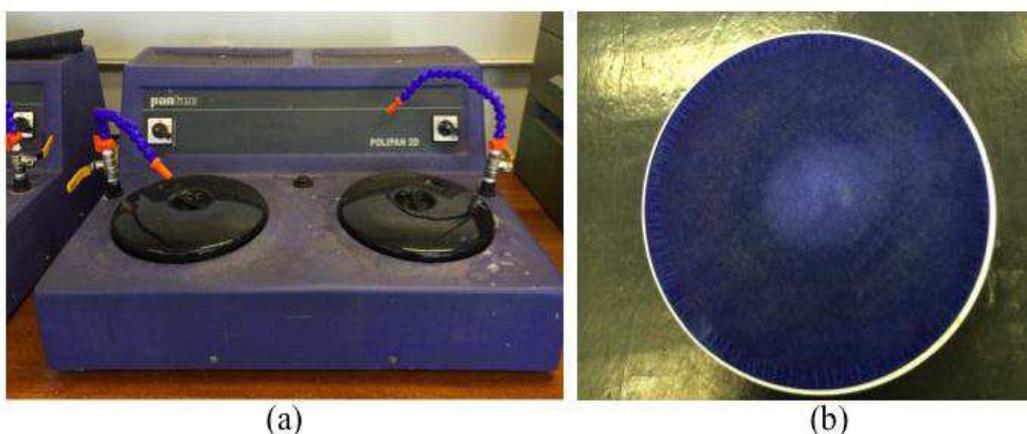


Figura 3.10 – (a) Politriz Polipan 2D da Pantec. (b) Tecido de poliéster.

Antes de começar o teste devem ser determinados os parâmetros que serão utilizados no ensaio, como a quantidade de carga e o tipo de penetrador a usar. Foi escolhido o indentador esférico de aço temperado com um diâmetro de 1/16 polegadas (1,5875 mm) pela dureza não tão elevada que se espera deste tipo de ferros fundidos. Dentre as opções foi escolhida a carga de 100 kg pelo que o teste é classificado como Rockwell tipo B (HR_B).

Depois da preparação da amostra, a peça é colocada na plataforma de suporte do aparelho com alguma das faces polidas na parte superior, imediatamente depois a amostra é elevada até realizar contato com o penetrador e é aplicada uma pré-carga de 10 kg. Tendo claro o tipo de teste que será realizado, é aplicada a carga adicional escolhida dependendo do tipo de dureza Rockwell.

Finalmente o aparelho exibe no painel superior o valor final da dureza tipo Rockwell. Com ajuda de tabelas e fórmulas de conversão, é possível também determinar a dureza em outro tipo de escala como Brinell, Vickers e outras.

3.2.5 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é sem dúvida o ensaio mais importante e mais usado para ajudar a definir as propriedades mecânicas de um material. O ensaio consiste basicamente, como descreve Garcia et al. (2000), em aplicar esforços na direção axial tomando as medidas das deformações sofridas para valores correspondentes de força aplicada.

O ensaio de tração fornece uma boa quantidade de informação sobre as propriedades mecânicas do material após fazer um tratamento dos resultados brutos obtidos no teste. Segundo Askeland (2008), a partir deste teste podemos obter dados importantes do tipo quantitativo e qualitativo sobre a resistência, rigidez e ductilidade do material ensaiado.

As informações principais do ensaio de tração são obtidas principalmente do gráfico de tensão contra deformação construído a partir das forças aplicadas nos ensaio e as dimensões do material.

Para realizar o teste de tração, normalmente os materiais devem ser moldados até obter uma forma padrão denominados corpos de prova, assim podem ser trabalhados em dimensões mundialmente conhecidas e podem ser facilmente

implementadas máquinas de tração universais. A norma internacional ASTM E8 (2015) descreve, para materiais metálicos, os tipos e as dimensões dos corpos de prova que devem ser utilizados nos ensaios de tração. Existem diferentes formas padrões para os corpos de prova do ensaio de tração. Amostras cilíndricas, tubulares e de outros tipos também são contempladas nas normas internacionais, dependendo às vezes do tipo de material que vai ser trabalhado ou a sua seção transversal predominante. A norma internacional DIN 50125 (2004) propõe também vários tipos e medidas de corpos de prova padrão.

A velocidade com a qual vai ser realizado o teste também varia de um material para outro, normalmente as normas internacionais recomendam um valor dependente da taxa de deformação num intervalo de tempo, assim, o mais usual é estabelecer a velocidade do teste em termos de milímetros por minuto (mm/min), porém, quando o ensaio é realizado para fins de acadêmicos este valor de velocidade recomendado pode ser alterado dependendo da situação sem fugir dos intervalos lógicos para o material.

No processo de tração o material sofre um processo que vai desde a deformação elástica até a plástica e usualmente termina com a falha da amostra. Na Figura 3.11 é mostrado um gráfico típico de Tensão contra Deformação. Desde a origem do gráfico até o limite elástico, tem-se a fase elástica do material, a partir desse ponto o material entra em uma fase plástica, onde a sua deformação é irreversível.

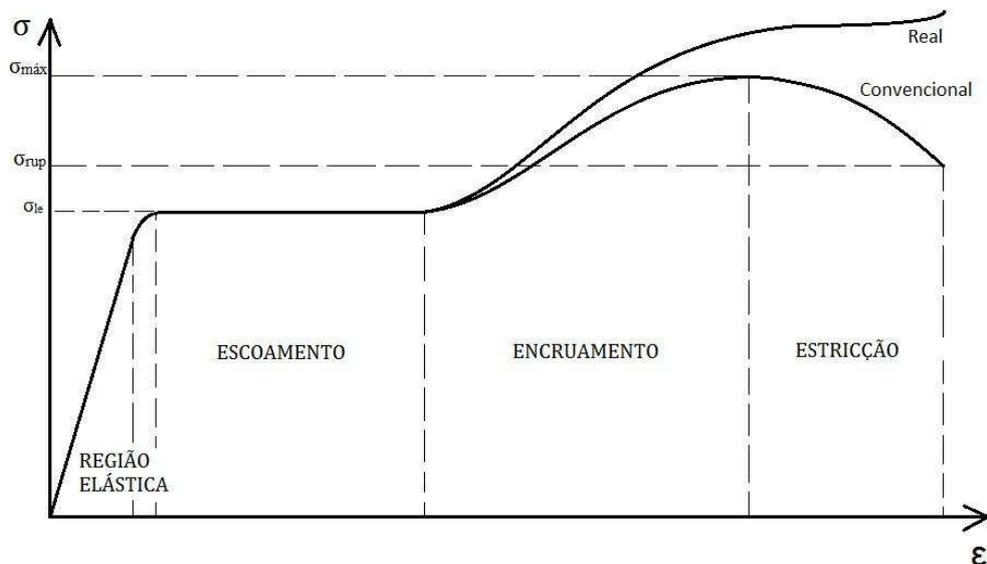


Figura 3.11 – Comportamento típico gráfico Tensão – Deformação.

Na fase elástica do material o gráfico apresenta um comportamento linear, representado pela lei de Hooke (1678). Essa fase linear pode ser representada pela Equação 3.5. Onde E é conhecida como módulo de elasticidade ou de Young. As variáveis σ e ε correspondem aos valores de tensão e deformação respectivamente.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{ou} \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.5)$$

Por outro lado, como explica Hibbeler (2010) o limite de escoamento é o ponto logo após terminar o comportamento elástico do material, a deformação que acontece a partir deste ponto é deformação plástica. O limite de escoamento é bem definido ou não dependendo do tipo do material, porém, é muito usado para a maioria dos metais o método da deformação residual, que consiste em um procedimento gráfico onde é realizada uma linha paralela à parte elástica do diagrama de tensão–deformação que passa pelo valor de 0,2% no eixo das deformações. O ponto onde essa linha se intercepta com o gráfico original representa de forma aproximada o valor do limite de escoamento e é expresso comumente em MPa.

Hibbeler (2010) também explica como obter o coeficiente de Poisson para um material homogêneo e isotrópico, que deve ser único em todo o corpo. O coeficiente de Poisson corresponde à relação entre a contração da seção transversal e o alongamento da seção longitudinal depois da deformação no ensaio de tração expressada num número adimensional. A equação 3.6 mostra a fórmula para calcular o coeficiente e depende de ε_{lat} que é a deformação na seção transversal e ε_{long} que representa a deformação na seção longitudinal.

$$\nu = \frac{\varepsilon_{lat}}{\varepsilon_{long}} \quad (3.6)$$

O alongamento percentual do material no ensaio de tração também pode fornecer informação sobre a ductilidade do material, Askeland e Phulé (2008) definem na Equação 3.7 a forma de calcular este valor, onde l_0 e l representam os comprimentos antes e depois de realizado o teste, respectivamente.

$$\text{Alongamento percentual} = \frac{l-l_0}{l_0} \cdot 100 \quad (3.7)$$

A Figura 3.12 mostra a máquina para ensaios de tração universal INSTRON 8801 onde foram realizados todos os testes de tração do presente trabalho no Laboratório de Materiais localizado no campus de Gama da UnB. A máquina possui uma célula de carga com capacidade de 100 kN de carga e um software (Bluehill 3) para a configuração dos testes e o tratamento dos dados. Este tipo de máquina para ensaios de tração tem a capacidade de testar a maioria de tipos de corpos de prova recomendados pelas normas internacionais, possuindo um jogo de garras que aceita corpos de prova retangulares com uma espessura de até 12 mm e amostras cilíndricas com até 16 mm de diâmetro.

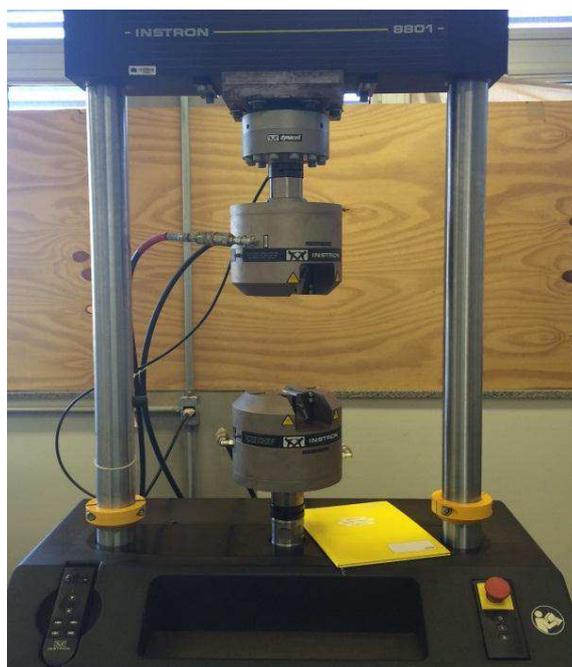


Figura 3.12 – Máquina de tração INSTRON 8801.

A partir do ensaio de tração convencional, está se afirmando que a deformação em todo o material se comporta de forma uniformemente distribuída. Isto é uma aproximação da realidade, pois depois do corpo de prova alcançar a resistência à tração máxima e até a ruptura, o material experimenta estrição e a deformação se comporta de maneira não uniforme.

As medidas da deformação que o corpo de prova apresenta no ensaio de tração são obtidas convencionalmente por um extensômetro ligado à máquina de

tração. Este dispositivo obtém medidas axiais do corpo de prova enquanto é tracionado, medindo a deformação global no corpo de prova. No presente trabalho é também realizado o ensaio de tração substituindo este extensômetro por uma técnica de metrologia ótica onde é possível obter a gradiente de deformações em toda superfície do corpo de prova. Com ajuda desta técnica de CDI é possível obter dados de tensão-deformação mais fiéis à realidade, pois não reconhece a deformação no material como uniformemente distribuída.

Foram realizados ensaios de tração para os dois tipos de materiais. Os ensaios de tração para o GGG 40 foram realizados usando as duas técnicas de medição das deformações: extensômetro e CDI. O ensaio de tração sobre o polímero foi realizado exclusivamente com a técnica de CDI usada sobre o PS sem reforço e sobre o compósito de PS com reforço de fibras de celulose de bagaço de cana-de-açúcar, com o objetivo de comparar o comportamento do material com a adesão das fibras na matriz polimérica. São mostrados a continuação os corpos de prova utilizados para cada caso.

3.2.5.1 Ensaio de tração sobre GGG 40 usando extensômetro

O ensaio de tração convencional, onde as deformações são tomadas com um extensômetro, foi realizado usando um corpo de prova retangular com o formato sugerido pela norma internacional ASTM E8 (2015) e com as dimensões da Tabela 3.2, mostradas a continuação.

Tabela 3.2 – Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração convencional.

Fonte: Adaptado de ASTM E8 (2015)

Dimensões (mm)	G	W	T	R	L	A	B	C
	25,0	6,0	6,0	6,0	100,0	32,0	30,0	10,0

Por serem corpos de prova retangulares, a sua confecção se baseia principalmente no corte do material por meio de serra automática, esse processo deixa as faces do material com um alto grau de rugosidade. Foi realizado um processo de lixamento dos corpos de prova até obter uma superfície lisa, evitando a presença de algum tipo de concentrador de tensões.

Os ensaios seguiram as condições e procedimentos estabelecidos na norma internacional ASTM E8 (2015). O ensaio foi realizado, à temperatura de 27°C e humidade relativa de 30% e usando uma velocidade de teste de dois milímetros por minuto (2 mm/min).

O resultado final da fabricação dos dois (2) corpos de prova do material ferro fundido nodular tipo GGG 40 pode ser observado na Figura 3.13.



Figura 3.13 – Corpos de prova retangulares de GGG 40 para ensaio de tração.

Inicialmente foi considerado realizar a avaliação das propriedades de tração usando a técnica de CDI sobre estes corpos de prova retangulares, porém, a área útil dos corpos de prova que resultou da sua fabricação ficou muito reduzida. Uma área útil reduzida pode ser um problema para realizar um padrão de pontos válidos e reconhecível pelo sistema ótico DIC. Por isto, foi necessária a aquisição de um novo lote de material com a área de avaliação necessária para utilizar o CDI. Optou-se também por mudar o formato do corpo de prova a cilíndrico atendendo a recomendação de algumas normas internacionais, como a DIN 50125 (2004) e ASTM E8/E8M (2015), para o material ferro fundido.

3.2.5.2 Ensaio de tração sobre GGG 40 usando CDI

O ensaio de tração usando correlação digital de imagens para obter os valores de deformação foi realizado com corpos de prova diferentes, baseado na norma internacional DIN 50125 (2004). A Figura 3.14 mostra os corpos de prova e suas dimensões usados para este trabalho.

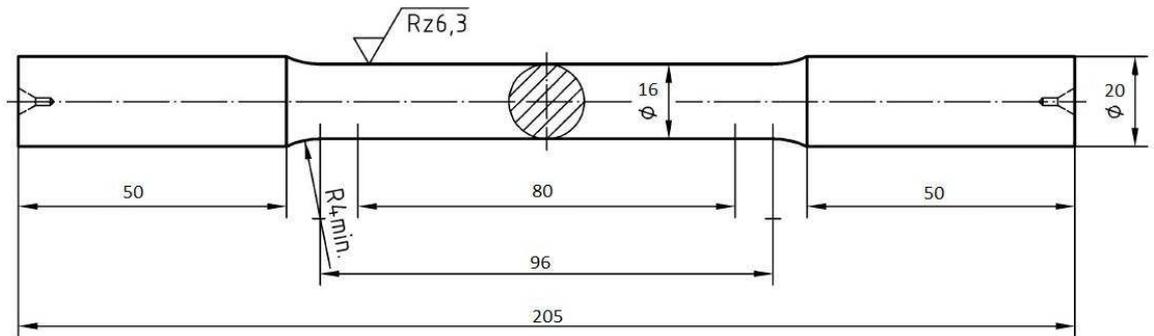


Figura 3.14 – Corpo de prova cilíndrico de GGG 40 usado para ensaio de tração.

Fonte: Adaptado de DIN 50125 (2004)

Para este tipo de ensaio de tração, foram tracionados quatro (4) corpos de prova com uma velocidade de dois milímetros por minuto (2 mm/min). Tanto a temperatura como a humidade relativa foram as do ambiente, com valores de 27°C e 30%, respectivamente.

O teste de tração usando CDI se diferencia do convencional só pela forma em como são obtidos os dados de deformação, onde já não é usado um extensômetro para medir as deformações médias do corpo de prova enquanto sofre tensão, senão que é usada uma técnica de correlação de imagens totalmente independente da máquina de tração.

A técnica de correlação digital de imagem usada tem a capacidade de avaliar o comportamento da deformação do material em um ponto ou região desejada, obtendo assim resultados mais parecidos com a realidade.

3.2.5.3 Ensaio de tração sobre PS sem reforço e PS reforçado com fibras de celulose de bagaço de cana-de-açúcar usando CDI

Foram realizados ensaios de tração sobre o material polimérico com e sem reforço fibroso. Foram obtidos os corpos de prova de tração, com as dimensões mostradas na Figura 3.15 e obtidas da norma ASTM D638 (2002) para o Tipo I.

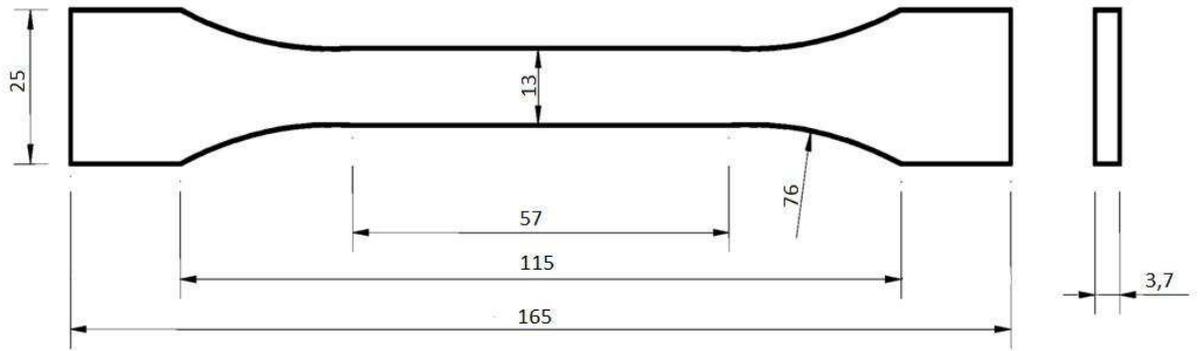


Figura 3.15 – Corpos de prova do poliestireno usados para ensaio de tração.

Fonte: Adaptado de ASTM D638 (2002)

Foram confeccionados dois (2) corpos de prova para ensaio de tração de poliestireno reciclado (PS), um deles no seu estado puro e o restante foi reforçado com fibras de celulose de bagaço de cana-de-açúcar na sua estrutura. O resultado final dos corpos de prova de PS e o compósito feito de PS e fibra de bagaço de cana-de-açúcar podem ser observados na Figura 3.16.



Figura 3.16 – Corpos de prova para ensaio de tração de PS (Em cima) e compósito de PS com fibra de bagaço de cana-de-açúcar (Embaixo).

3.2.6 Técnica de Correlação Digital de Imagem (CDI)

A técnica de correlação digital de imagem (CDI) foi usada com a finalidade de obter medidas de deformação e deslocamento dos corpos de prova enquanto são traçados até a ruptura. Em síntese, seguindo a linha de Frankovský et al. (2013) o sistema de CDI pode obter remotamente o campo de deslocamentos e deformações

da superfície do corpo de prova fazendo uma comparação entre imagens antes e depois do processo de tração tendo como referência uma série de pontos na superfície da amostra com distribuição aleatória e com a capacidade de se deformar junto com o material.

Para o presente trabalho foi usado um sistema conhecido como Digital Image Correlation System (Q-400) da empresa Dantec Dynamics. O sistema possui o hardware e software para a obtenção de imagens e o processamento das mesmas para obter os deslocamentos e as deformações no momento desejado do teste e em qualquer parte da região avaliada, conhecida como Região de Interesse (RDI). Uma câmera de cinco (5) megapixels do sistema é a encarregada de tirar as imagens da superfície do material iluminada por um sistema de iluminação Hilis, estroboscópio de luz fria de LED, que faz parte do sistema Q-400 e que provê ótimas condições de iluminação forte e homogênea. Na Figura 3.17 podemos observar parte do sistema instalado na montagem experimental do ensaio de tração.

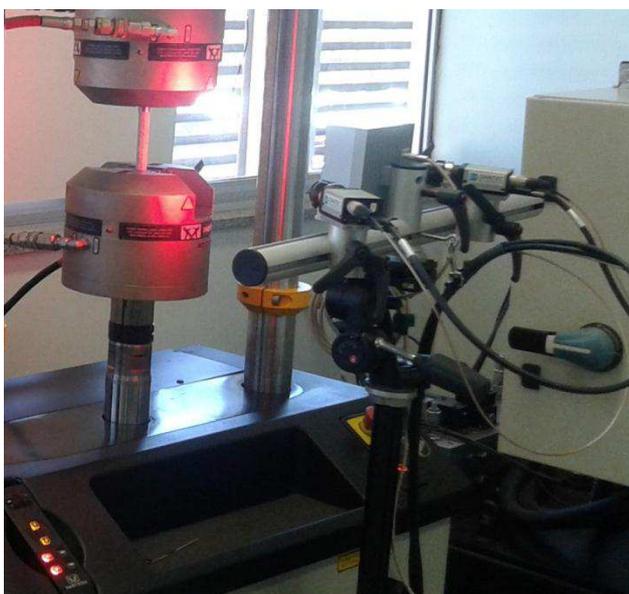


Figura 3.17 – Câmera do Sistema de CDI Q-400 da empresa DANTEC Dynamics.

Inicialmente foi desenhado um padrão de pontos nos corpos de prova do ensaio de tração para cada caso, pois o sistema faz a avaliação das deformações baseado na deformação desses pontos impressos no material. A Figura 3.18 mostra os padrões de pontos desenhados nos corpos de prova ensaiados, onde a) é a imagem do poliestireno (PS) e em b) aparecem as amostras cilíndricas do ferro

fundido nodular GGG 40 preparadas. Os pontos desenhados nos corpos de prova de PS foram realizados usando um equipamento de marcação por comando numérico computacional onde os pontos são feitos por uma caneta de ponta fina (1.0 mm) de cor preta. Já os pontos do corpo de prova de GGG 40, por ser cilíndrico, foram realizados usando tinta spray espalhada diretamente sobre o corpo de prova com o auxílio de cerdas de uma escova de dente.

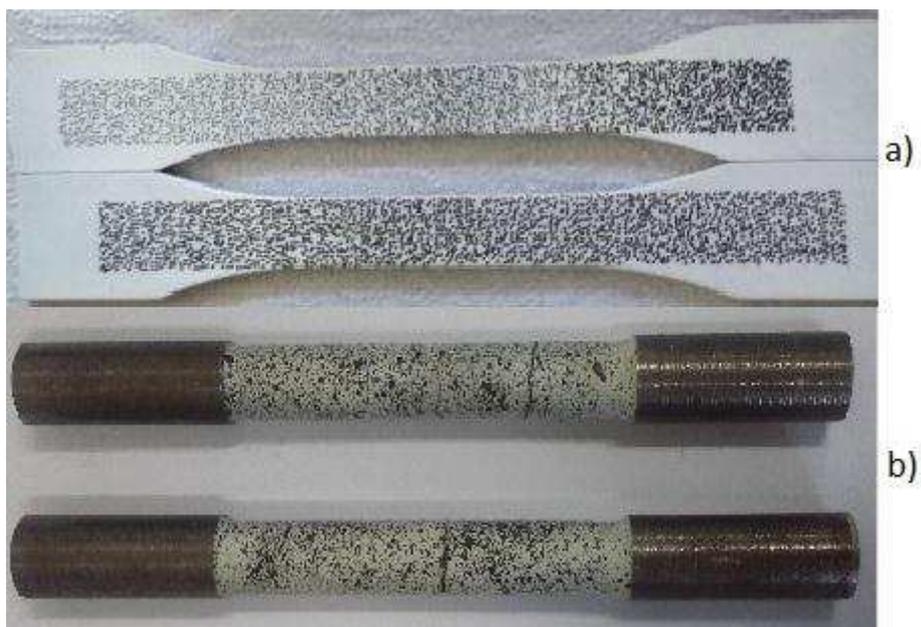


Figura 3.18 – Padrões de pontos desenhados nos corpos de prova de a) Poliestireno (PS), b) Ferro fundido nodular GGG 40.

O sistema de CDI requer a calibração de alguns parâmetros como a distância focal, a distorção do raio da lente, os parâmetros focais e alguns parâmetros extrínsecos como o vetor deslocamento e a matriz de rotação. O sistema Q-400 possui uma placa de calibração, DANTEC DYNAMICS de 11 mm de alumínio, com três pontos localizados no centro onde, como pode se observar na Figura 3.19. São determinados os eixos principais de reconhecimento da câmera, e os seus vetores de deslocamento e rotação. Após o reconhecimento com a câmera sobre a placa de calibração avaliada em diferentes posições, são determinados os diferentes parâmetros externos e é obtido o resíduo final do processo e representa a incerteza média apresentada pelas medições em termos de pixels (Figura 3.20).

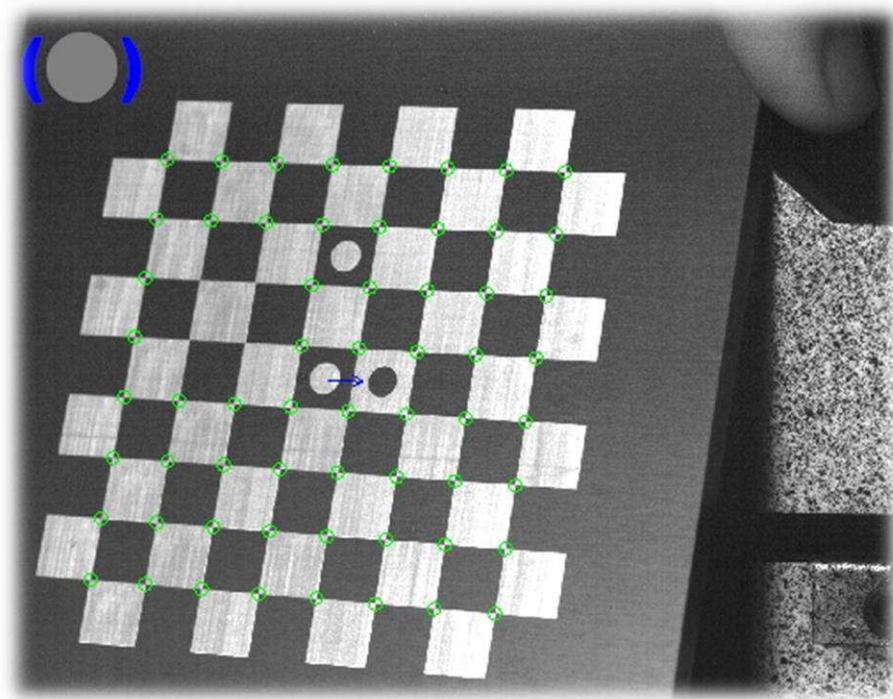


Figura 3.19 - Placa de calibração DANTEC DYNAMICS AI MBM 11 mm.



Figura 3.20 - Parâmetros de calibração e resíduo do sistema de CDI.

Antes de começar o processo de obtenção de imagens é necessário ativar o software Istra4D que também faz parte do sistema Q-400 e pelo qual são feitos todos os ajustes necessários. É determinada a RDI, que é a área escolhida como a mais representativa para avaliar os deslocamentos e deformações do material.

É importante ter em conta na hora de realizar a instalação de hardware do sistema que a iluminação é um fator de grande importância para o reconhecimento dos pontos pelas câmeras. Um ambiente muito escuro pode dificultar a identificação dos pontos e, pelo contrário, quando se tem muita luz sobre o corpo de prova pode ser gerada muita refletância, perturbando assim a nitidez das imagens. Para isto o sistema de iluminação Hilis de luz fria de LED possui um regulador que controla a intensidade da luz dependendo da luminosidade do lugar.

Deve se registrar uma primeira imagem digital do corpo de prova sem ter experimentado ainda nenhum tipo de deformação, pois essa imagem será a de referência. Uma vez começado o teste de tração tira-se imagens digitais da RDI até o momento da ruptura do corpo de prova. A Figura 3.21 mostra o corpo de prova posicionado na máquina do ensaio de tração e a câmera do sistema CDI posicionada.

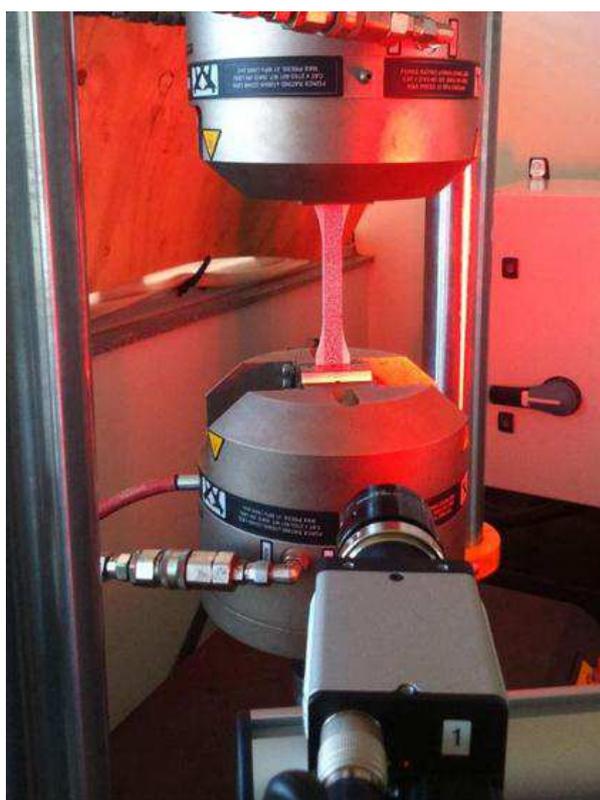


Figura 3.21 – Montagem do sistema de CDI e corpo de prova no ensaio de tração.

O sistema de CDI é totalmente independente do ensaio de tração, por isso os tempos de aquisição para ambos os sistemas também são totalmente independentes, com base nisso teve que ser criado um procedimento onde

pudessem ser pareados os dados da tensão adquiridos na máquina de tração para cada dado de deformação apresentado pelo CDI. Como não é possível garantir exatidão no momento de começar o teste e o começo de aquisição do teste, toma-se como tempos de referência o instante no qual acontece a fratura do corpo de prova, assim, a partir desse instante são pareados os tempos em forma regressiva até o começo do teste.

Uma vez adquiridas as imagens em sequência e realizada a correlação das imagens digitais no Istra 4D, o software realiza uma malha virtual subdividindo a RDI, como é mostrado na Figura 3.22, e realiza todos os cálculos de deslocamento de cada ponto físico.

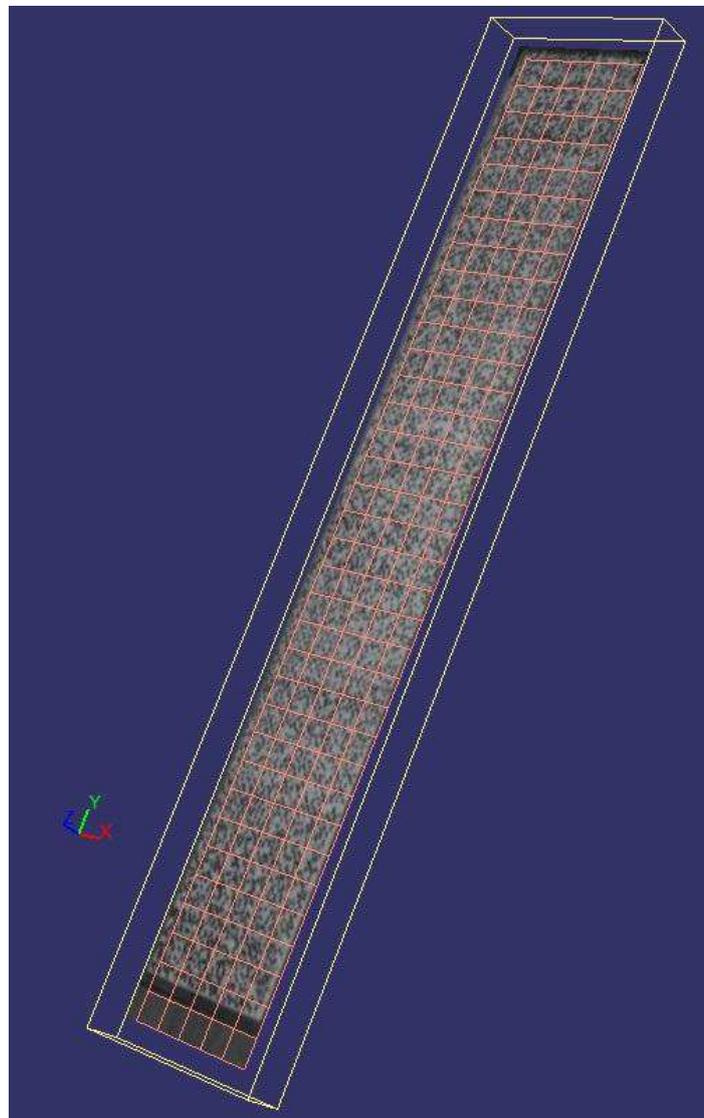


Figura 3.22 – Malha gerada pelo sistema de CDI sobre RDI em corpo de prova de tração.

Os deslocamentos são calculados para cada ponto da malha virtual e as deformações são calculadas para cada sub-região da malha. São obtidos assim, os campos de deslocamento e deformação para as imagens digitais adquiridas, usando como referência a primeira fotografia obtida antes de começar a tracionar os corpos de prova.

4. RESULTADOS E ANÁLISE

A seguir são apresentados os resultados obtidos nos procedimentos experimentais realizados sobre os materiais, assim: inicialmente são mostrados os resultados dos ensaios realizados sobre a liga metálica de GGG 40 com as suas respectivas propriedades mecânicas. Posteriormente, são expostos os resultados obtidos para o material de matriz polimérica e uma análise dos seus resultados.

4.1 FERRO FUNDIDO NODULAR GGG 40

4.1.1 Análise MEV

A Figura 4.1 mostra a análise a partir da MEV do material GGG 40, usando uma resolução de 200 μm . É possível identificar a presença de manchas escuras no material as quais representam as inclusões de grafita características de um ferro fundido nodular GGG 40.

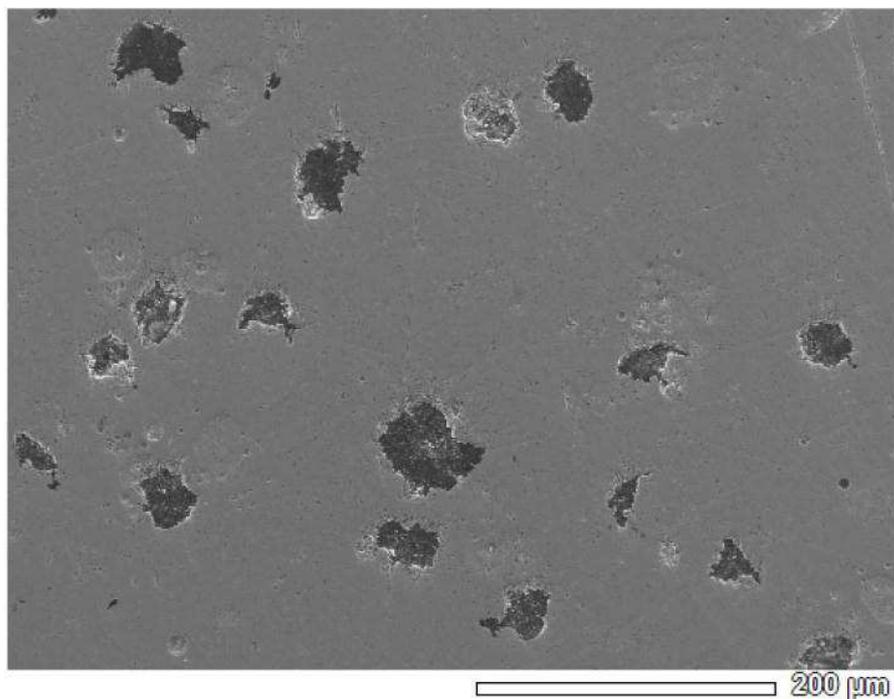


Figura 4.1 – Imagem do MEV do Ferro Fundido Nodular GGG 40 com resolução de 200 μm .

A Figura 4.2 mostra uma classificação dos tipos de grafita presentes nas ligas de ferro fundido, as ligas nodulares possuem inclusões de grafita do tipo V e VI na imagem. Na imagem obtida da análise MEV com escala de 200 μm é possível observar as inclusões de grafita na amostra com aparência nodular, semelhantes ao tipo V. Como explica Ferreira (2013), o tipo de grafita desenvolvido na liga depende principalmente da composição química e o tempo de nodularização.

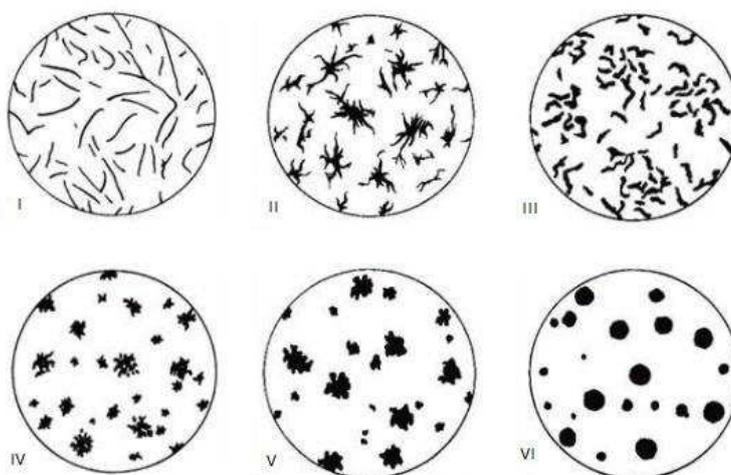


Figura 4.2 – Classificação do tipo de grafita dentro dos ferros fundidos.
Fonte: ISO 945 (2008)

A Tabela 4.1 mostra os elementos achados pelo MEV e as quantidades em porcentagem presentes na superfície analisada da amostra do GGG 40. Pode-se observar também que os valores encontrados são semelhantes com os resultados obtidos por Zhang et al. (2016). Como era de se esperar, o Ferro (Fe) é quem predomina no material com mais de 90 % na análise, seguido do Carbono (C) e o Silício (Si).

Tabela 4.1 – Porcentagem de componentes do GGG40 pelo MEV.

Elemento (%)	Fe	C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Mg
Presente Trabalho	92,59	3,65	2,50	0,57	0,26	0,24	0,12	0,07
Zhang et al. (2016)	93,9	3,35	2,25	0,30	0,025	0,04	0,02	0,039

Existe uma pequena porcentagem de material que não é determinado com exatidão na análise de composição química do material, pois o tipo de teste

realizado não permite a detecção de elementos em quantidades muito pequenas de massa. Especificamente, aqueles materiais que possuem uma massa menor a 0,2% podem não ser detectados na análise de MEV. No caso do GGG 40, Zhang et al. (2016) mostra que este material tem pequenas quantidades de Enxofre (S) e Cobre (Cu), no entanto, esses elementos foram ausentes nos resultados do presente trabalho.

Materiais que conduzem facilmente a eletricidade, como os ferros fundidos são os mais fáceis de analisar por via MEV, pois a boa circulação dos elétrons devido a sua boa condutividade evita a acumulação de carga e permite uma melhor avaliação do material. Por outro lado, materiais que são bons condutores de calor minimizam a degradação do material.

Da análise MEV é possível observar que o material usado cumpre com a composição química esperada do GGG 40, pois a quantia dos seus elementos principais se encontra dentro dos intervalos característicos para este tipo de ferro fundido.

A aparência nodular da grafita vista na análise MEV explica um pouco as boas propriedades mecânicas do material em comparação com outro tipo de ferros fundido com inclusões de grafita mais alongadas, pois o formato nodular evita a geração de concentradores de tensões que induzem às falhas mais rapidamente.

4.1.2 Análise Termogravimétrica (TGA)

A Figura 4.3 mostra os resultados apresentados em forma de gráficos onde, para cada valor de temperatura em graus centígrados ($^{\circ}\text{C}$), são mostrados os valores da massa em miligramas (mg).

Pode-se observar que até os 1350°C de temperatura o material perdeu aproximadamente um 3% do valor da sua massa total em só um decaimento pronunciado, apresentando no final um valor de massa de 57,444 mg. A variação de massa começa acontecer de forma mais evidente desde que o corpo de prova atinge os 1000°C ; em um aumento de 300°C desde este ponto o material perde pouco mais de 2% de massa, mas até atingir essa temperatura o material já vinha perdendo uma porcentagem pequena de massa devida provavelmente à perda de humidade da amostra.

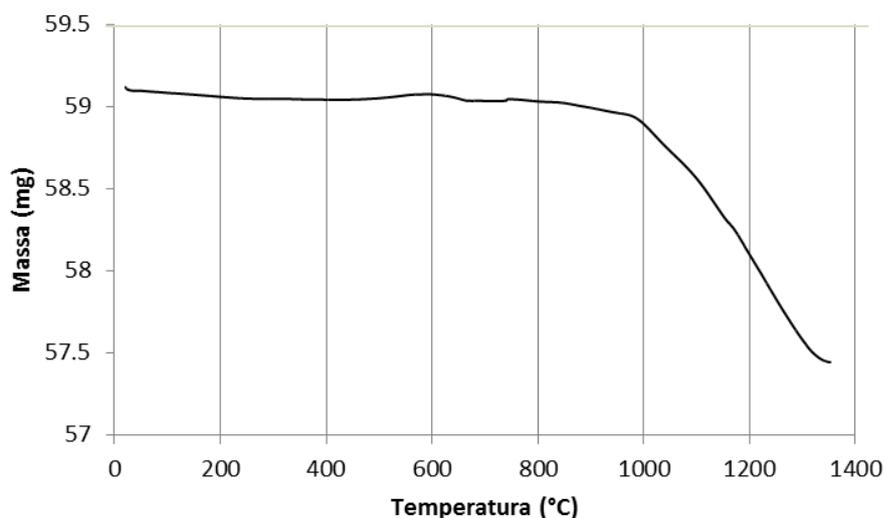


Figura 4.3 – Termograma. Gráfico de massa contra temperatura do material GGG 40.

Para complementar, foi realizado também o gráfico da derivada do termograma dm/dT (Figura 4.4) que permite observar um comportamento mais exato da perda de massa em algumas temperaturas, ou seja, a temperatura de eliminação, informação que não é evidente na própria curva. Podem-se observar no gráfico da derivada diversas reações da amostra (picos), logo no início é observada uma reação rápida seguida por outras reações pequenas, provavelmente pela perda de humidade do material. A partir dos 600°C pode ser observada uma série de reações secundárias no material, mostrando uma perda maior de massa perto dos 1200°C.

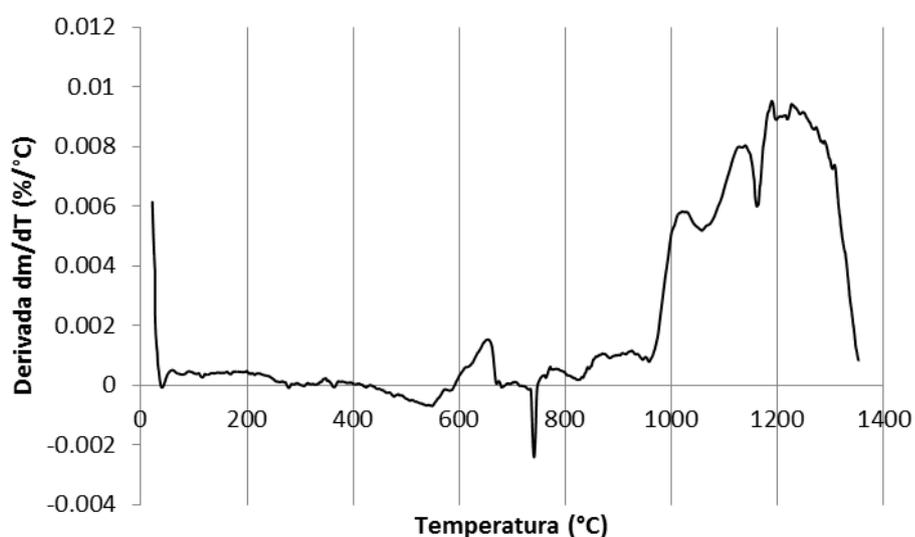


Figura 4.4 – Derivada dm/dT do termograma.

O equipamento usado para a análise TGA possui a capacidade de atingir até uma temperatura máxima de 1500°C, pelo qual não foi possível continuar observando o comportamento da variação da massa do material até temperaturas mais elevadas, nas quais poderia provavelmente ser identificada a perda de massa com a transformação de alguns elementos do material em gases. Caso o equipamento atingisse temperaturas maiores seria possível identificar com maior certeza quais dos elementos dentro do material são os que ocasionam cada reação de perda de massa, dependendo da sua temperatura de fusão.

Da análise de TGA pode-se observar como o material começa ter pequenas perdas de massa até os 1000°C, provavelmente devidas a perda de umidade que a amostra ainda conservava no momento do teste. Já uma perda de massa mais considerável começa acontecer a partir dos 1000°C, pelo qual é recomendável ter cuidados com este material quando é submetido a temperaturas superiores a este valor. Por limitações do equipamento não foi possível obter medições da variação da massa com temperaturas superiores aos 1350°C, por tanto não foi possível obter uma informação completa e dos elementos que sofreram a reação de forma diferenciada.

É provável que a grafita, com seu elevado ponto de fusão, não tenha sofrido nenhuma alteração ao experimentar o processo de análise de TGA. A grafita, segundo Sampaio (2005), possui um ponto de fusão mais elevado que qualquer dos outros componentes presentes no ferro fundido nodular, com um valor superior aos 3500°C. Já a empresa Matbase (2017) informa que a temperatura de fusão do GGG 40, como material, está no intervalo entre 1150 e 1250°C, deduzindo então que este valor depende principalmente do componente metálico dentro do material.

Comumente é estabelecida uma temperatura de serviço entre -100°C e 400°C para este tipo de ferro fundido, conservando um fator de segurança e evitando qualquer tipo de deformação ou falha na peça devido a temperaturas superiores.

4.1.3 Ensaio de Impacto

A Tabela 4.2 mostra finalmente os resultados obtidos nos 20 ensaios de impacto, organizados das menores às maiores temperaturas, mostrando a energia de impacto absorvida em Joules (J) para cada ensaio. A coluna que mostra os

valores de temperatura contempla para cada valor um erro de 2°C estabelecido pelo fabricante da câmara térmica. No caso do resultado da energia, o equipamento adverte um erro de 5% para cada valor obtido.

Tabela 4.2 – Resultados ensaios de impacto do GGG 40 para diferentes temperaturas.

Ensaio	Temperatura (°C)	Energia (J)
1	-29,6 ± 2,0	3,00 ± 0,15
2	-24,6 ± 2,0	3,00 ± 0,15
3	-20,3 ± 2,0	3,00 ± 0,15
4	-18,5 ± 2,0	3,00 ± 0,15
5	-11,7 ± 2,0	3,00 ± 0,15
6	-4,3 ± 2,0	4,00 ± 0,20
7	-0,7 ± 2,0	4,00 ± 0,20
8	4,6 ± 2,0	3,00 ± 0,15
9	10,7 ± 2,0	4,00 ± 0,20
10	24,1 ± 2,0	4,00 ± 0,20
11	25,1 ± 2,0	3,00 ± 0,15
12	60,8 ± 2,0	7,00 ± 0,35
13	63,2 ± 2,0	8,00 ± 0,40
14	91,3 ± 2,0	13,00 ± 0,65
15	96,2 ± 2,0	13,00 ± 0,65
16	99,5 ± 2,0	12,00 ± 0,60
17	194,0 ± 2,0	15,00 ± 0,75
18	200,0 ± 2,0	14,00 ± 2,0
19	205,4 ± 2,0	13,00 ± 0,65
20	252,0 ± 2,0	13,00 ± 0,65

Com os resultados da energia de impacto absorvida pelos corpos de prova foi realizado um gráfico da temperatura contra os valores de energia, mostrado na Figura 4.5. É apresentado também no gráfico um valor aproximado do valor da temperatura de transição do material, representada por uma linha segmentada.

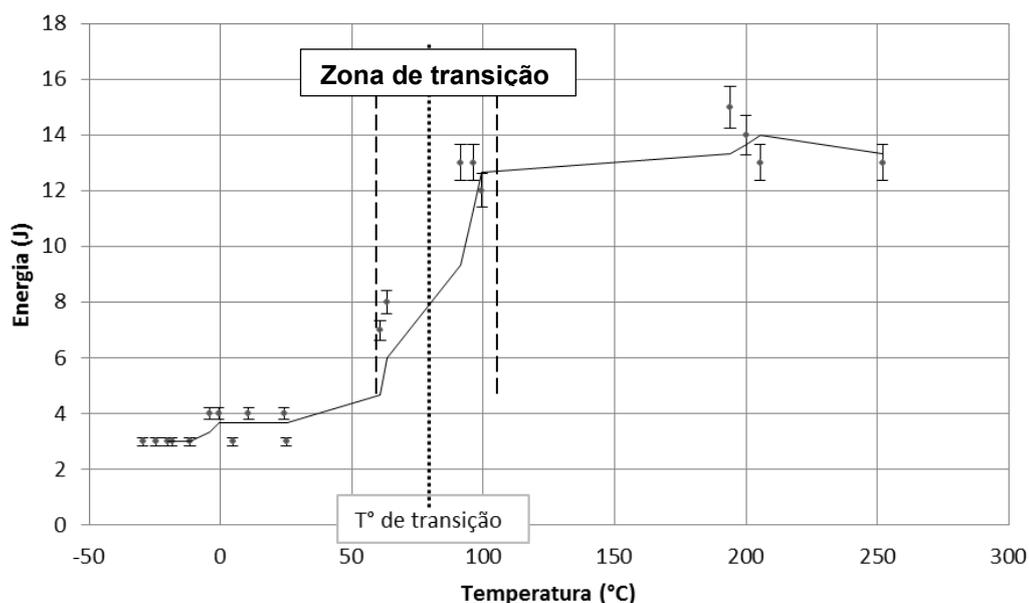


Figura 4.5 – Gráfico da temperatura versus energia absorvida de impacto do GGG 40

No gráfico da Figura 4.5 pode-se observar a transição do comportamento do material do estado frágil a um estado mais dúctil com a mudança da temperatura dos corpos de prova nos testes. A temperatura de transição (T° de transição) pode ser estimada dentro da região de transição tentando obter o valor médio. Para as amostras de GGG 40 ensaiadas se estabeleceu uma temperatura de transição de aproximadamente 80°C . A transição do comportamento do material do estado frágil ao estado dúctil pode ser observada também na Figura 4.6 que mostra a aparência da fratura dos corpos de prova depois de ensaiados.

Cada corpo de prova fraturado na Figura 4.6 tem sua respectiva legenda, que indica o número do ensaio, a temperatura com a que foi ensaiado e o valor da correspondente energia absorvida no impacto. É possível apreciar que as fraturas exibidas pelos corpos de prova com uma temperatura mais baixa possuem uma aparência mais fina e uma rugosidade baixa, o que indica um comportamento frágil na hora da fratura. Os corpos de prova com temperaturas mais elevadas evidenciam o caso contrário, as faces fraturadas mostram uma maior rugosidade deixando uma superfície mais áspera. Pode-se até se observar nesses últimos corpos de prova uma deformação nas laterais das faces falhadas, experimentando algumas contrações na hora de falhar, características de falhas mais dúcteis no material.



Figura 4.6 – Aparência das faces fraturadas dos corpos de prova de GGG40.

Foi evidenciado nesta fotografia que o comportamento das faces fraturadas é de caráter frágil em comparação com outro tipo de metais que apresentam uma estrição lateral mais evidente, onde se tem uma taxa de deformação maior.

É importante determinar a temperatura de transição dúctil-frágil do material ante o impacto, pois o ideal quando um material vai ser submetido a um esforço na sua aplicação é que tenha um comportamento dúctil. Baseado nisto, deve-se procurar então que quando um material sofre algum tipo de impacto enquanto está em serviço tenha uma temperatura de transição menor que a temperatura do entorno da peça. Esta informação ajuda então com uma escolha certa do material visando garantir uma possível fratura do material o mais dúctil possível.

No ensaio de impacto foi possível observar que o GGG 40 possui uma transição no comportamento do material de frágil a dúctil conforme o aumento da temperatura, assim, foi determinada a temperatura de transição de 80°C entre a faixa de transição observada no gráfico resultante dos ensaios de impacto a diferentes temperaturas.

4.1.4 Ensaio de Dureza

Para poder realizar um tratamento estatístico dos dados e procurar um resultado mais preciso estatisticamente, foram realizadas cinco (5) medições de dureza Rockwell tipo B (HR_B). Na Tabela 4.3 podem ser observados os resultados destes ensaios.

Tabela 4.3 – Resultados ensaio de dureza Rockwell para GGG 40

Medição	1	2	3	4	5
HR_B	90,9	91,1	90,5	90,7	91,8

Obteve-se então um desvio padrão de 0,5 entre os resultados e um valor de 91,0 como média dos resultados de dureza. Finalmente podemos dizer que o valor de dureza Rockwell tipo B para o ferro fundido nodular GGG 40 trabalhado corresponde a $91,0 \pm 0,5 HR_B$.

Como foi expresso no capítulo dois (2) do presente trabalho, entre as propriedades mecânicas do material GGG 40, o valor esperado da dureza para este tipo de material na literatura foi mostrado em escala Brinell e dentro de um intervalo entre 150 e 200 HB.

Para efeitos de comparação com a literatura, é feita uma conversão do valor da dureza Rockwell obtida para a escala Brinell fazendo uso da tabela apresentada pela norma internacional ASTM E140 (2012), onde se tem que para um valor de dureza 91 HR_B é correspondente uma dureza Brinell de 190 HB.

Podemos observar então que o valor da dureza obtido para o material trabalhado no ensaio corresponde ao valor esperado segundo as informações na teoria.

Do ensaio de dureza pode-se dizer que o comportamento do ferro fundido nodular é do tipo frágil, ainda nas temperaturas mais elevadas, em comparação com outros tipos de ligas metálicas como podem ser observados na Tabela 4.4.

O ferro fundido possui uma melhor usinabilidade em comparação com outros tipos de ferros fundidos e aços, pois, os valores de dureza para estas outras ligas são bastante maiores, dificultando assim os processos de fabricação de peças.

Tabela 4.4 – Dureza Brinell para algumas ligas metálicas.

Fonte: Chiaverini (2002) e Shackelford (2008)

Liga	Dureza Brinell [HB]
Ferro fundido Branco	450 – 600
Ferro fundido cinzento	248 – 290
Aço carbono 1040	230 - 240

Devido à boa usinabilidade encontrada com o ensaio de dureza, é possível deduzir que o GGG 40 possui uma boa quantidade de aplicações nos quais é necessário um grande esforço de acabamento no material e os custos são um fator de grande importância. Assim, se para um projeto de engenharia se tem uma variada opção de possíveis materiais que cumprem com as características da resistência à qual vai ser submetido, o parâmetro da dureza pode ser um fator determinante em questão de economia. Sendo o ferro fundido uma boa escolha entre uma grande variedade de ligas metálicas.

Uma maneira de relacionar o valor da dureza do material com as propriedades do ensaio de tração é por meio de gráficos e tabelas encontradas em algumas fontes bibliográficas e em manuais de máquinas de dureza. A Figura 4.7 mostra a relação entre o resultado da dureza Brinell e a resistência à tração do material, tendo assim mais um parâmetro para avaliar a validade dos resultados das propriedades mecânicas obtidas.

No gráfico é possível observar curvas diferentes para o ferro fundido nodular e outros tipos de metais. No caso do ferro fundido nodular, representado com a curva de cor azul, pode-se apreciar que para o valor de dureza obtido no ensaio, correspondente a 190 HB, se tem um valor de resistência a tração de aproximadamente 450 MPa. Este valor de resistência à tração se encontra próximo ao valor estabelecido por Chiaverini (2002) no seu trabalho, de 450 MPa. Com esta propriedade de tração obtida de forma indireta, podem também ser avaliados os resultados do ensaio de tração, buscando confirmar este valor.

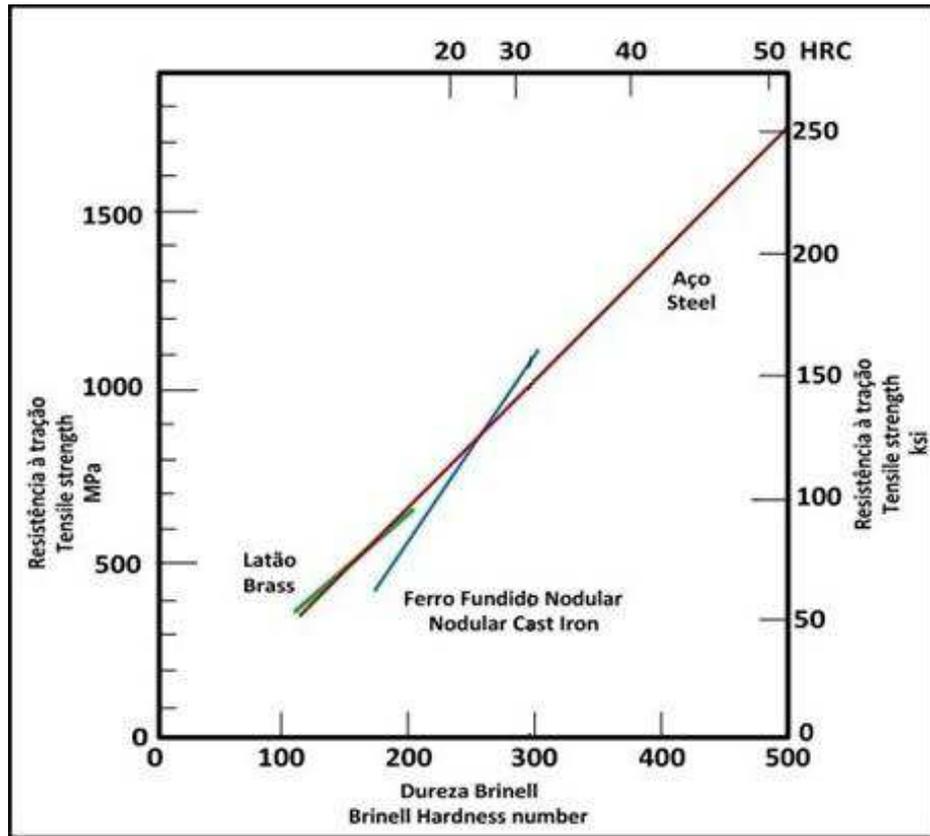


Figura 4.7 – Relação entre a dureza Brinell do material e a resistência à tração.
 Fonte: Mitutoyo (2006).

4.1.5 Ensaio de Tração

O gráfico de tensão versus deformação é a principal informação obtida do ensaio de tração, pois a partir dele são determinadas as propriedades mecânicas do material. Com o ensaio de tração também é possível encontrar propriedades mecânicas e de comportamento importantes do material, como o coeficiente de Poisson.

4.1.5.1 Curvas Tensão - Deformação

A Figura 4.8 mostra os gráficos de tensão-deformação para os dois corpos de prova retangulares ensaiados usando o extensômetro. Neste gráfico é possível ver os valores do limite de escoamento usando o método da deformação residual para cada um dos corpos de prova.

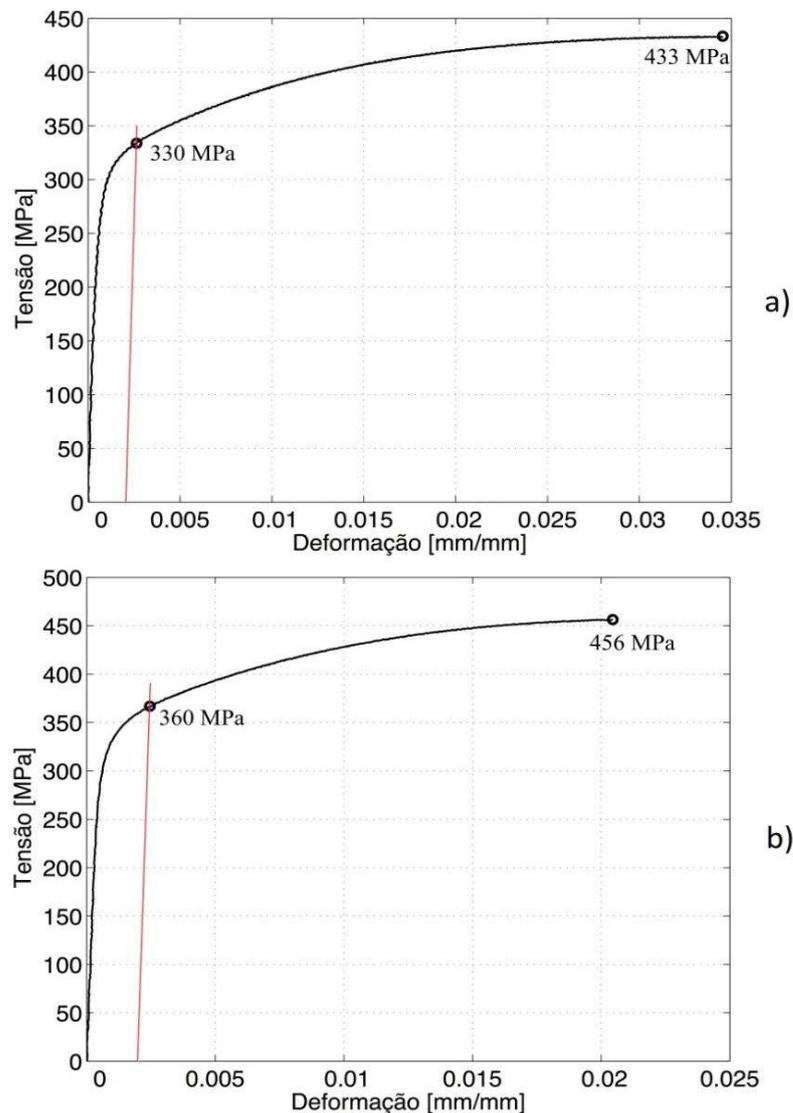
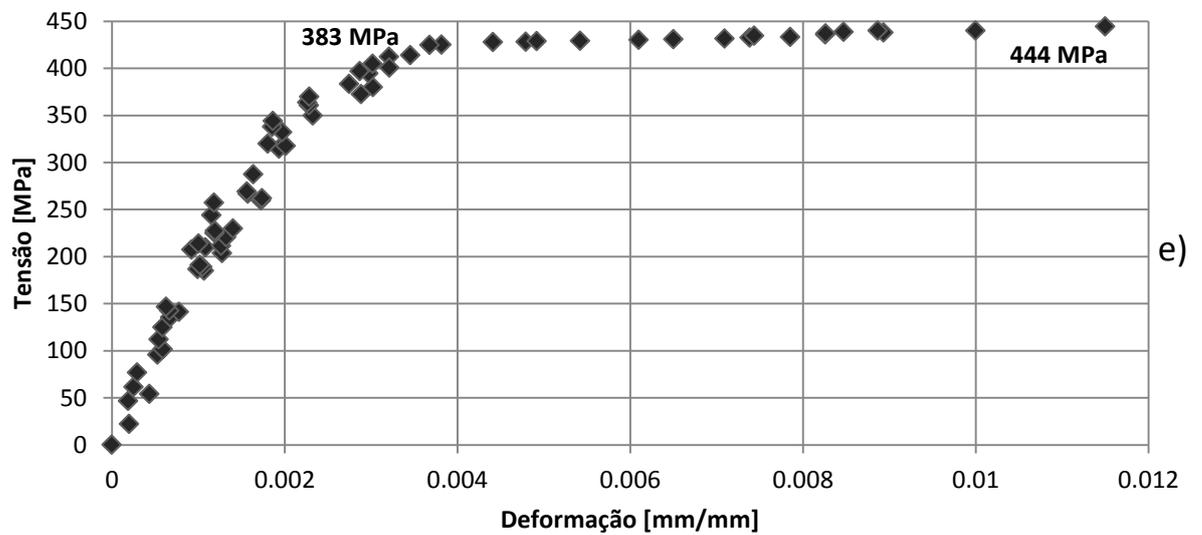
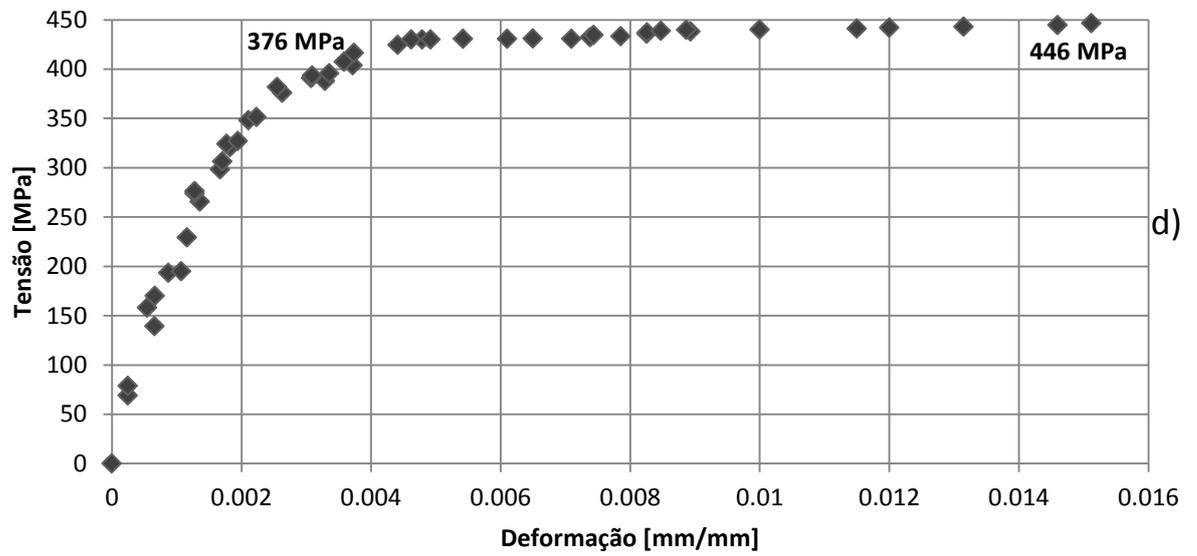
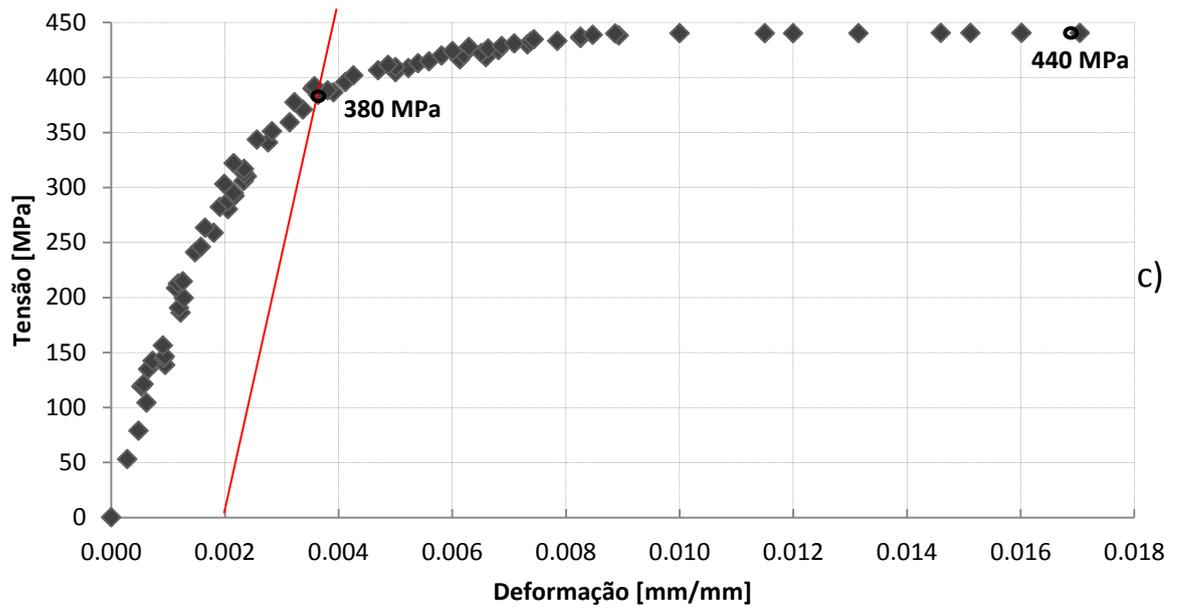


Figura 4.8 – Gráfico tensão–deformação para corpos de prova retangulares, corpos de prova *a*, *b*.

Um novo lote de corpos de prova de GGG40, porém de geometria cilíndrica também foram ensaiados. O lote era composto de cinco corpos de prova e os resultados do ensaio de tração para cada um deles pode ser apreciado conforme a Figura 4.9. Este lote de corpos de prova foi preparado para o ensaio de tração usando a técnica de CDI. Os gráficos mostram também os valores da resistência à tração e limite de escoamento, obtidos para cada corpo de prova, utilizando o método da deformação residual.



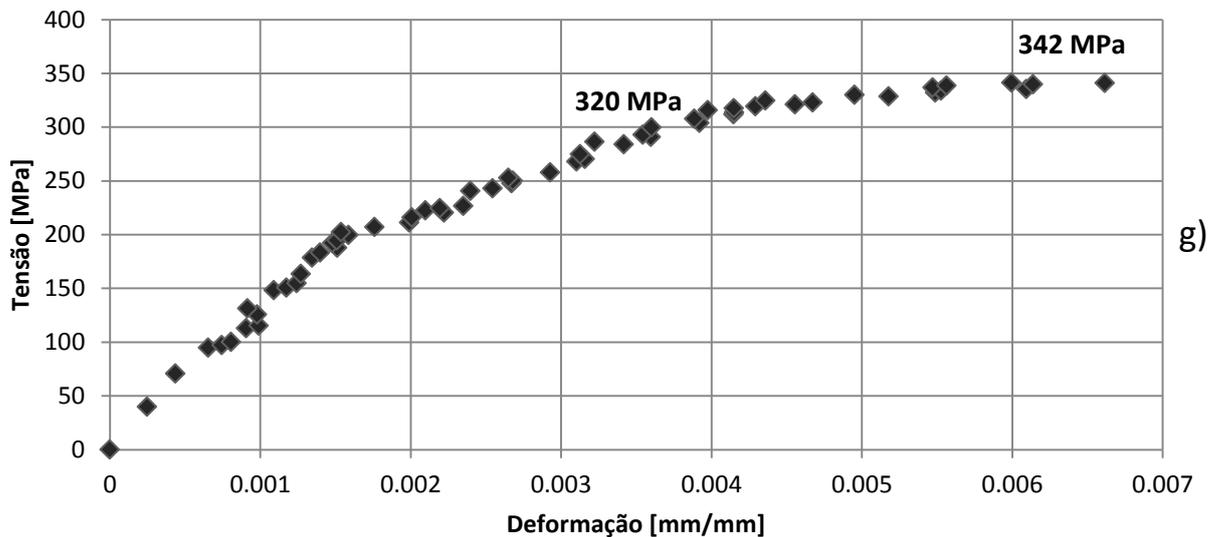
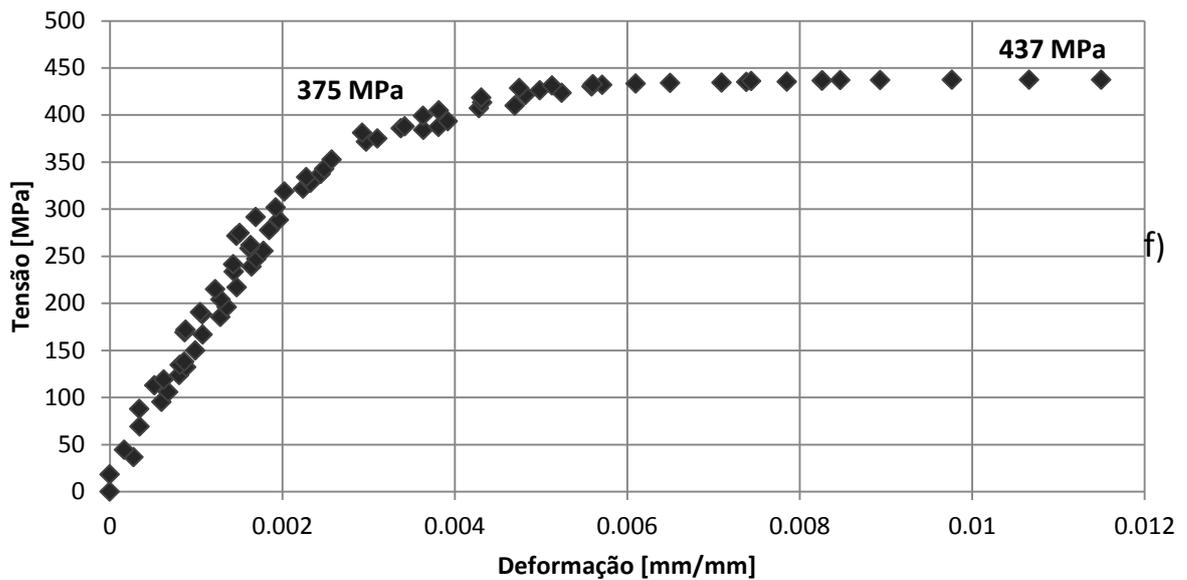


Figura 4.9 - Gráficos tensão–deformação para corpos de prova cilíndrico usando CDI.
Corpos de prova *c, d, e, f, g*.

Dos cinco gráficos apresentados, os quatro primeiros apresentam resultados com valores conforme esperado para este tipo de material. O gráfico da Figura 4.9g, porém, apresenta propriedades mecânicas de tração menores às obtidas nos restantes. Realizando uma observação detalhada neste corpo de prova, pode-se observar na Figura 4.10, a presença de um propagador de falha na região onde aconteceu a ruptura. Esta bolha propagadora de falhas provavelmente foi produzida no momento da fabricação do material, onde o vazamento da liga líquida não foi

realizado com os cuidados necessários e foi permitida a criação de uma bolha de ar no material até a sua solidificação.



Figura 4.10 – Corpo de prova *g* com evidente falha em forma de bolha no lugar da fratura.

Os resultados discordantes e inferiores da curva da Figura 4.9g, em comparação com os corpos de prova das curvas da Figura 4.9c à f, e a identificação visual de uma imperfeição no material indicam uma invalidade no corpo de prova. Como os resultados das propriedades mecânicas deste corpo de prova foram bastante distantes da média, optou-se por descartar os seus valores.

4.1.5.2 Coeficiente de Poisson

Com o ensaio de tração não foi possível obter o coeficiente de Poisson por não termos um transdutor para medir a contração do corpo de prova. O equipamento utilizado para ensaio de tração só possui um extensômetro usado para obter exclusivamente as deformações verticais. No entanto, a técnica de CDI permite obter os gradientes de deslocamentos e de deformações na superfície desejada do corpo de prova e em qualquer direção, por isso, diferente do ensaio realizado com extensômetro, é possível agora apresentar o valor do coeficiente de Poisson para o material.

Na Figura 4.11, obtida do software Istra4D, é possível observar o procedimento realizado para obter o valor médio da deformação lateral no corpo de prova, ou contração, e a deformação longitudinal.

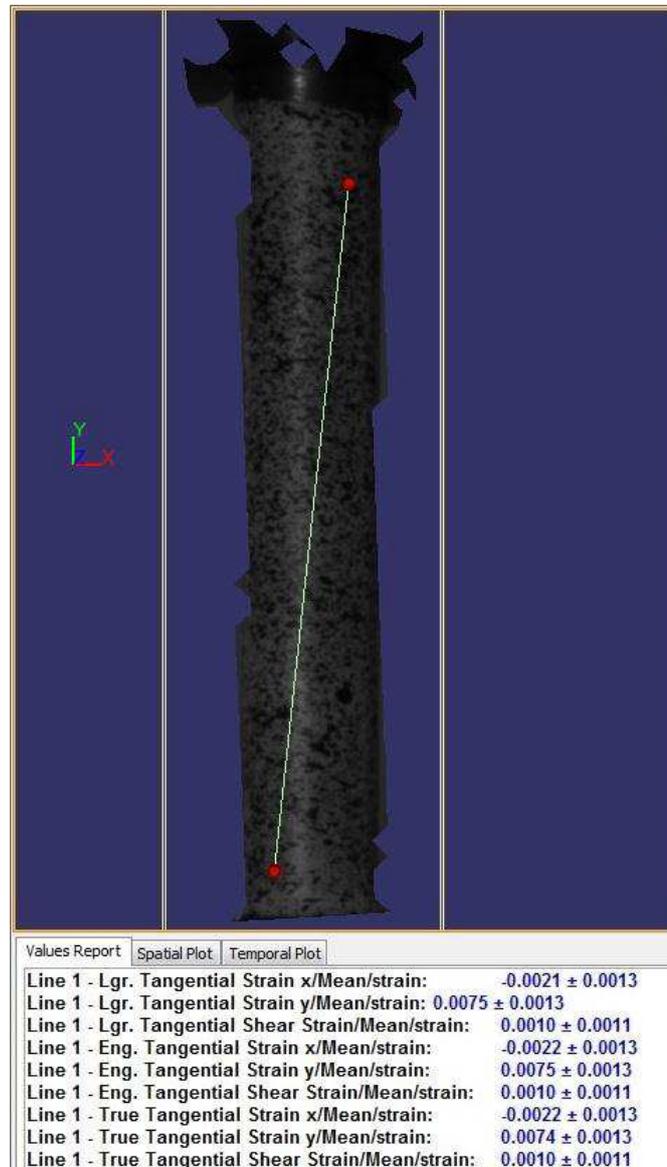


Figura 4.11 – Valores médios da deformação lateral e longitudinal para calcular o coeficiente de Poisson.

Neste procedimento, é realizada uma linha localizada dentro da área útil do corpo de prova e que envolva uma grande variedade de direções no gradiente de deformação, por isto foi desenhada uma linha diagonal. Desta linha foram obtidas as médias das deformações nas duas direções principais. Assim, na Equação 4.1 é realizado o cálculo, usando as deformações obtidas pelo método de Lagrange

tangencial do Istra4D, para a obtenção do coeficiente de Poisson do corpo de prova representado pela Figura 4.9c.

$$-\frac{\text{Deformacao lateral}}{\text{Deformacao longitudinal}} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = -\frac{-0.0021}{0.0075} = 0.28 \quad (4.1)$$

Os valores do coeficiente de Poisson, obtidos da mesma maneira para cada corpo de prova, representam a relação entre a contração e o alongamento do material.

4.1.5.3 Propriedades mecânicas de tração do GGG 40.

A Tabela 4.5 apresenta de forma sintética os resultados das principais propriedades mecânicas obtidas para os corpos de prova ensaiados, incluindo os corpos de prova retangulares para ensaio de tração com extensômetro e os corpos cilíndricos onde foi usada a técnica de CDI.

Tabela 4.5 – Propriedades mecânicas de tração obtidas para GGG 40 usando extensômetro e CDI.

Propriedades Mecânicas	Tração usando Extensômetro		Tração usando CDI				
	a	b	c	d	e	f	g
Limite de resistência à tração [MPa]	433	456	440	446	444	437	342
Limite de escoamento [MPa]	330	360	380	376	383	375	320
Módulo de elasticidade [GPa]	197	195	172	175	171	170	133
Coeficiente de Poisson	-	-	0,28	0,29	0,30	0,29	-

A Tabela 4.6 mostra os resultados obtidos para cada tipo de ensaio de forma comparativa, conferindo as médias dos dados obtidos usando extensômetro, usando CDI, com os de algumas fontes bibliográficas. Nesta tabela são colocados os valores

das principais propriedades mecânicas do material como a resistência à tração, módulo de elasticidade, limite de escoamento, coeficiente de Poisson e alongamento percentual. Os valores apresentados na tabela das propriedades mecânicas de tração obtidas correspondem às médias dos corpos de prova testados para cada caso.

Tabela 4.6 - Resultados do ensaio de tração para o GGG 40 usando extensômetro e CDI.

Propriedade Mecânica	Extensômetro	CDI	Fontes Bibliográficas
Limite de resistência à tração [MPa]	445	442	445 (Chiaverini, 2002) 400 (Brown, 2000)
Módulo de elasticidade [GPa]	196	172	160-185 (DIN 1693, 2005)
Limite de escoamento [MPa]	345	379	310 (Guesser, 2002) 280-380 (Ferreira, 2013)
Alongamento Percentual [%]	12	13	12 (NBR 6916, 2017) 15 (DIN EM 1693, 2005)
Coeficiente de Poisson	-	0,29	0,28-0,29 (DIN EN 1693, 2005)

A maioria das propriedades mecânicas obtidas estão dentro dos valores obtidos por outros pesquisadores. O limite de escoamento, porém, mostrou um resultado elevado em comparação com a maioria de fontes bibliográficas. Segundo Chiaverini (2002) a estrutura do ferro fundido é determinada principalmente pela sua composição química e a velocidade de esfriamento ou tempo de nodularização, influenciando diretamente nas suas propriedades mecânicas. Assim, este resultado pode ser justificado desde o ponto de vista destes fatores.

No trabalho de pesquisa realizado por Ferreira (2013) são analisadas as variações das propriedades mecânicas de vários ferros fundidos ao mudar o tempo de nodularização da grafita. Este tempo representa o processo no qual o Mg e FeSi entram em contato na liga, produzindo a grafita, e dependendo da temperatura se obtiveram tempos de nodularização entre 10 e 45 minutos. Na Figura 4.12 é mostrada a variação dos limites de escoamento, para dois lotes de ferro fundido

nodular, em função das temperaturas de vazamento, que influenciam diretamente no tempo de nodularização. Pode-se ver na imagem que os valores podem variar desde 280 até 380 MPa aproximadamente.

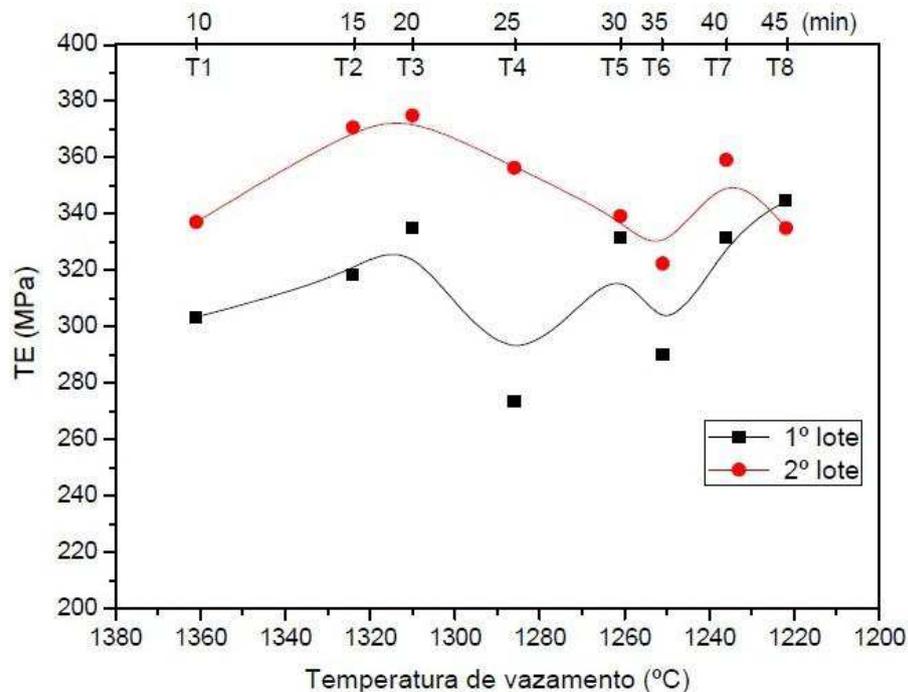


Figura 4.12 – Variação do limite de escoamento (TE) em função da temperatura e tempo de nodularização.

Fonte: Ferreira (2013)

Dependendo também dos fatores de composição química e tempo de nodularização, são desenvolvidos os tamanhos e formações das grafitas no material. Assim, quando se tem uma grafita mais esférica incluída no material, as propriedades mecânicas de resistência são melhores que quando são formadas em veios, pois são evitados concentradores de tensões que são encargados de propagar pequenas falhas. Na Tabela 4.7 são apresentadas algumas das propriedades mecânicas obtidas com ensaio de tração e a técnica de CDI e comparadas com outro tipo de ligas metálicas. Da comparação pode-se observar a boa competitividade do ferro fundido nodular do tipo GGG 40 com outros tipos de materiais bastante usados comercialmente. Karaman e Çetinarslan (2010) afirmam que o ferro fundido nodular apresenta um valor comercial entre 20 e 40% mais barato que o aço estrutural A36, tornando mais atrativa a escolha da liga ferrosa em muitas aplicações de engenharia.

Tabela 4.7 – Propriedades mecânicas obtidas do GGG 40 e propriedades mecânicas médias de alguns metais e ligas metálicas.

Propriedade Liga	Resistência à tração [MPa]	Módulo de elasticidade [GPa]	Alongamento Percentual	Coefficiente de Poisson
Ferro fundido nodular GGG-40 (presente trabalho)	442	172	13	0,29
Ferro fundido maleável (ASTM A- 197, 2015)	276	172	5	0,28
Ferro fundido Cinzento (ASTM A48, 2016)	179	67	0,6	0,28
Aço estrutural A36 (ASTM A36, 2014)	400	200	30	0,32
Aço inoxidável 304 (Shigley e Mischke, 2005)	517	193	40	0,27

4.1.6 Técnica De CDI

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com ajuda do software Istra4D, encarregado de processar e correlacionar às imagens. Os gradientes de deformações calculados pelo sistema de CDI proporcionam uma completa informação do comportamento dos corpos de prova ensaiados.

É apresentada, a modo de ilustração, a Figura 4.13, que representa o comportamento do corpo de prova da Figura 4.9a. O material apresenta um deslocamento máximo de quase três (3) mm e uma deformação acentuada na área onde se apresentou a fratura, de onde foram tomados os dados de deformação. Na mesma figura, é mostrada a imagem do corpo de prova depois de finalizado o teste e a sua correspondente fratura.

Todos os corpos de prova apresentaram um comportamento similar, onde a gradiente de cores evidencia a região com uma maior deformação e indica o lugar onde o corpo de prova irá falhar.

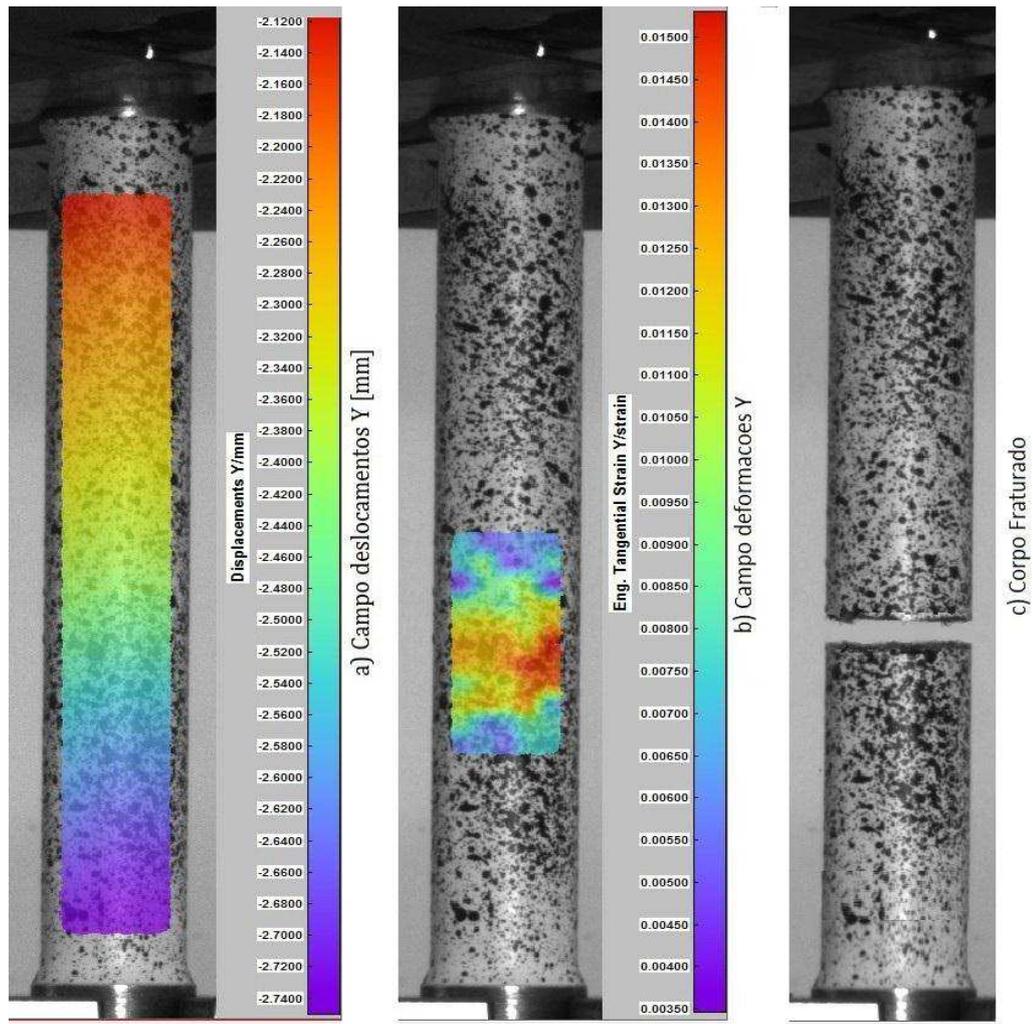


Figura 4.13 - Resultados do CDI para GGG 40 no instante antes da fratura; a) Campo de deslocamentos, b) Campo de deformações, c) Corpo de prova fraturado

A gradiente de deformação mostrada em escala de cores permite uma ideia visual do comportamento do corpo de prova enquanto sofre deformação. Gráficos com uma informação mais detalhada são exibidos na Figura 4.14, onde são apresentados os valores da deformação vertical média, para cada instante capturado pelas imagens, durante os esforços de tração aplicados para cada corpo de prova.

Deste gráfico é possível obter os dados máximos de deformação para cada corpo de prova e pode-se observar o incremento nos valores médios de deformação desde o início até a ruptura do material.

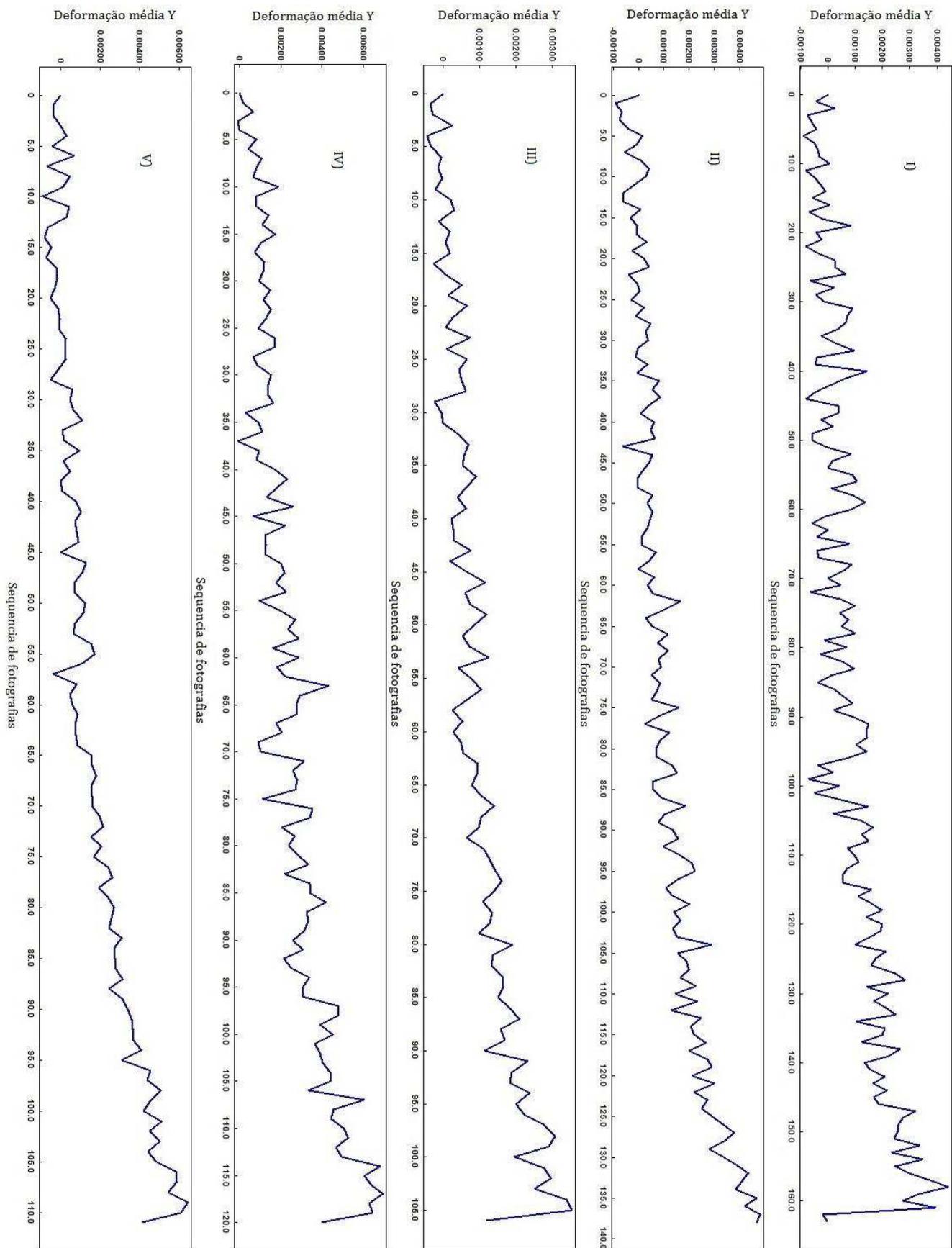


Figura 4.14 – Valor da deformação média em Y para cada fotografia, para os cinco (5) corpos de prova.

4.2 POLIESTIRENO (PS) E COMPÓSITO DE MATRIZ DE PS REFORÇADO COM FIBRAS DE CELULOSE DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

4.2.1 Análise MEV

A MEV foi realizada exclusivamente sobre os corpos de prova do material compósito, com a finalidade de observar a acomodação das fibras na matriz de PS. A Figura 4.15 mostra uma análise MEV que evidencia, em escalas de 20 e 50 micrometros (μm), a acomodação das fibras de celulose de bagaço de cana-de-açúcar na matriz de PS.

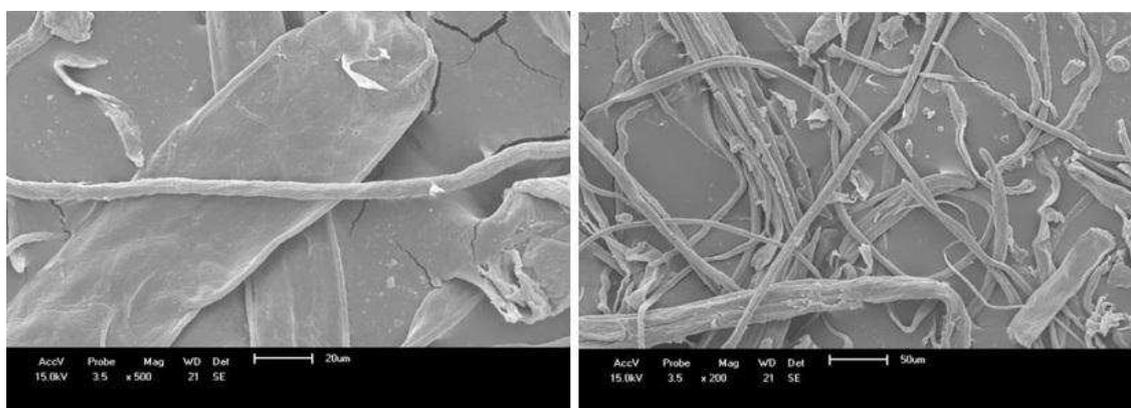


Figura 4.15 – Análise MEV sobre o PS reciclado reforçado com fibras de celulose de bagaço de cana-de-açúcar.

Da análise MEV cabe ressaltar que na inclusão das fibras de celulose, estas não possuem uma orientação definida evidente nos corpos de prova, distribuindo-se de forma aleatória dentro da estrutura do material.

4.2.2 Ensaio de Tração

Foi elaborado o gráfico de tensão-deformação para o PS e o compósito de PS e celulose de bagaço de cana-de-açúcar (Figura 4.16). Foram usados os dados de deformação obtidos com a técnica de CDI. Pode se observar no gráfico que a resistência à tensão obtida com o compósito é maior que a da matriz pura (PS).

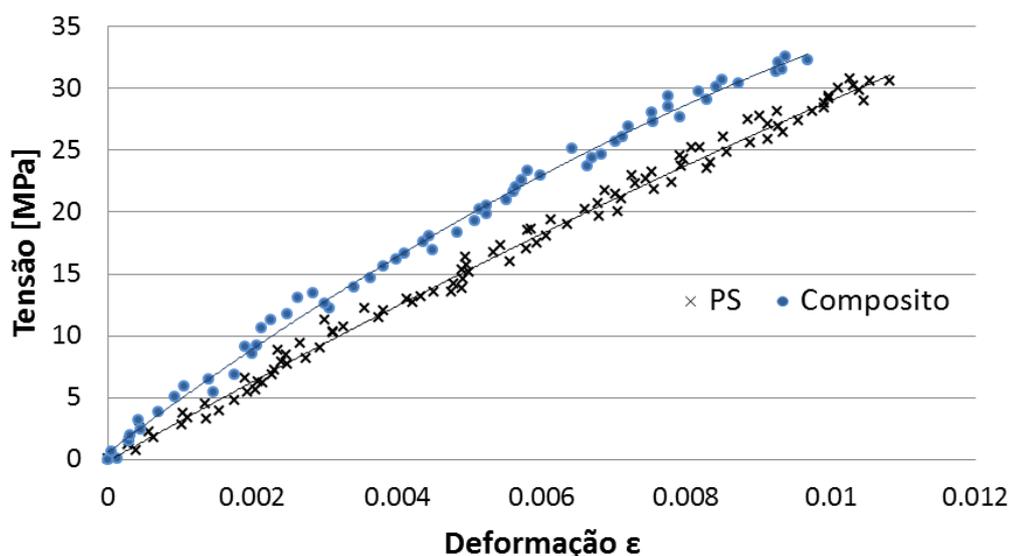


Figura 4.16 – Gráfico Tensão-Deformação para o PS e compósito de PS reforçado usando CDI.

Também na Tabela 4.8 são apresentados os resultados de resistência a tensão e módulo de elasticidade obtido com as deformações calculadas com CDI e os deslocamentos máximos para cada caso do PS reciclado e o compósito de celulose 20% (m/m)/PS. A resistência à tração do compósito mostrou um leve aumento de dois (2) MPa em comparação com o PS puro. O módulo de elasticidade, entre tanto, apresentou um incremento de mais de 30% quando foi avaliado o compósito, justificando então seu valor agregado no material ao melhorar as suas propriedades de resistência. Além disto, é calculado também o coeficiente de Poisson para o material analisando as deformações laterais e longitudinais calculadas pelo CDI.

Tabela 4.8 – Propriedades de tração para o PS e Compósito, propriedades de tração para o PS reciclado de outros autores.

Fonte: Djidjelli e Benachour (1998), Poletto et al. (2010), Derrick (2010).

Propriedade Mecânica	(Presente Trabalho)		Intervalos PS na literatura
	PS	Compósito	
Limite de resistência à tração [MPa]	30,5	32,6	15 - 35
Módulo de elasticidade [GPa]	3,0	4,1	3,0 - 3,6
Coeficiente de Poisson	0,30	0,31	0,31 - 0,33

Todos os valores encontrados para o material se encontram perto da faixa exposta por outros autores sobre estas propriedades, lembrando que o material usado é PS reciclado, pelo que é de esperar que as propriedades sejam menores em comparação com as apresentadas pelo poliestireno em seu estado puro.

Dos resultados do ensaio de tração foi evidenciado, no gráfico de tensão contra deformação, que com a adesão do reforço de fibras de celulose se tem um leve aumento na resistência do material. No caso do módulo de elasticidade é evidente a inclinação maior dos resultados do compósito em comparação com o PS unicamente, indicando uma rigidez maior no compósito.

A fibra de celulose do Bagaço de Cana-de-açúcar melhora as propriedades de resistência à tração do PS e melhora também o seu módulo de elasticidade. Ressaltando também que o PS utilizado como matriz foi obtido de EPS pós-consumo, pelo qual as suas propriedades mecânicas são um pouco inferiores às do PS tipo cristal ou puro.

Todos os valores obtidos por via dos ensaios mecânicos e CDI para o PS e o compósito, incluindo o coeficiente de Poisson, se encontram dentro de intervalos expostos em algumas referências bibliográficas.

4.2.3 Técnica de CDI

O objetivo do sistema de CDI é obter os campos de deslocamento e deformação para todo o corpo de prova e em qualquer momento no qual foram obtidas as imagens. Em Ramirez et al. (2016) são apresentados também os procedimento e resultados obtidos sobre a caracterização do PS. A Figura 4.17 mostra parte do resultado onde a) representa o gradiente de deslocamentos o instante antes da ruptura. A parte b) da figura mostra o campo de deformações também para o instante no qual está a ponto de experimentar a fratura e c) evidencia a fratura do corpo de prova. Cada mapeamento do corpo de prova foi realizado sobre a RDI mostrada na figura e com uma escala de cores que representa os valores dos deslocamentos e as deformações no eixo axial do esforço, respectivamente. Do campo de deslocamentos podemos observar que no ensaio de tração o cabeçote superior fica imóvel e o inferior é quem realiza o movimento de tração, apresentando um deslocamento máximo no extremo inferior

de aproximadamente 1.5 mm no instante antes da ruptura. Por outro lado, no campo de deformações podemos confirmar que o corpo de prova não apresenta uma estrição lateral muito evidente no momento da ruptura.

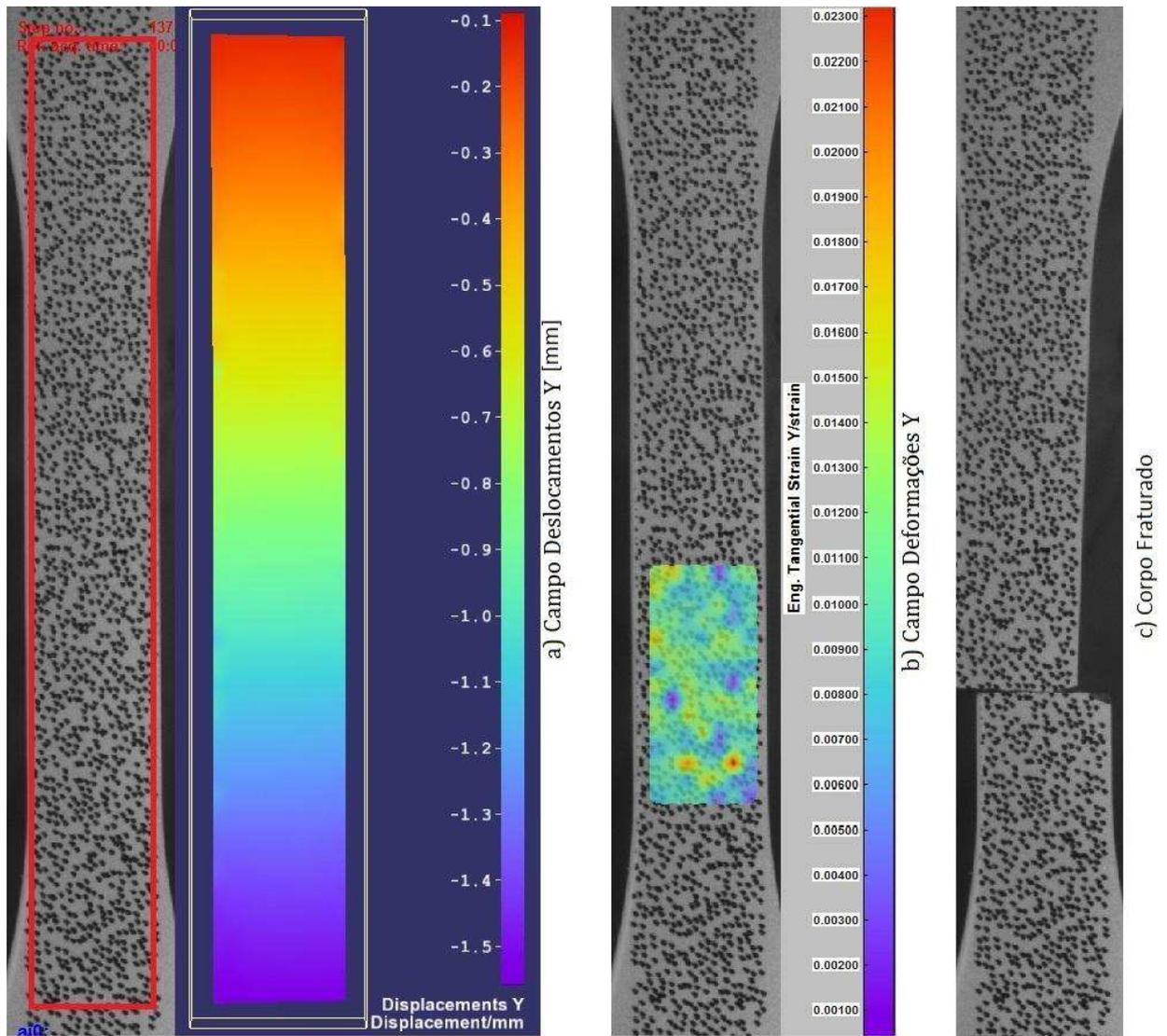


Figura 4.17 – Resultados do CDI para o PS no instante antes da fratura; a) Campo de deslocamentos, b) Campo de deformações.

A técnica de CDI foi verificada com o material e foram obtidos resultados coerentes com o esperado. Pode-se concluir então da experiência com este material, além da correta implementação do sistema de CDI, que a celulose do Bagaço de Cana-de-açúcar melhora as propriedades de tração do PS reciclado aumentando suas possíveis aplicações.

Em síntese, os procedimentos realizados para caracterizar o ferro fundido nodular GGG 40, o PS e o compósito foram satisfatórios, pois os seus valores se encaixaram dentro de intervalos lógicos ou referenciados. Os ensaios mecânicos e técnica de correlação digital de imagem apresentaram, de maneira independente e conjunta, resultados que foram coerentes com o esperado.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada uma caracterização do material ferro fundido nodular tipo GGG 40 e PS reforçado com fibras de celulose do Bagaço de Cana-de-açúcar, obtendo as suas principais propriedades mecânicas.

Foram pesquisados os conceitos e princípios básicos do material com os quais se queria trabalhar, assim como a informação teórica sobre caracterização de materiais e os respectivos ensaios que auxiliavam neste objetivo, com a finalidade de ter a informação básica que orientasse no desenvolvimento deste trabalho.

Os resultados dos ensaios mecânicos para o material GGG 40 revelaram importantes informações sobre as suas propriedades mecânicas. O material possui ótimas propriedades de resistência à tração comparáveis com materiais como o aço. A boa usinabilidade do material, deduzida do ensaio de dureza, faz com que seja um material com processos de manufatura mais econômicos em comparação com outras ligas metálicas.

A partir da caracterização mecânica do GGG 40 foi possível verificar que este material apresenta uma resistência à tração e rigidez maior do que outras ligas ferrosas, podendo ser comparável com a resistência de aços comerciais, como o aço estrutural A36.

O ensaio de dureza gerou resultados de dureza Brinell coerentes, dentro dos intervalos estabelecidos por Brown (2000). Foi realizada uma relação entre o valor da dureza Brinell e a resistência à tração do material. Como foi observado nos resultados deste trabalho, o valor obtido de 190 HB está relacionado a uma resistência a tração de aproximadamente 450 MPa. Este valor valida os ensaios realizados neste trabalho, pois se encontra bastante próximo dos valores de 445 MPa e 442 MPa obtidos nos ensaios de tração usando extensômetro e CDI, respetivamente. A dureza de 190 HB do material indica uma resistência ao desgaste aceitável, e boa usinabilidade, permitindo o modelamento de peças complexas de ferro fundido com relativa facilidade.

O ensaio de impacto permitiu definir a banda de transição dúctil-frágil, sendo assim, possível indicar as faixas de temperatura de trabalho a qual este material possui maior resistência.

Outro fator a ser ressaltado foi a possibilidade de identificar a grande influência que a quantidade e a forma das inclusões de grafita têm nas propriedades mecânicas do material. O ferro fundido GGG 40 possui inclusões de grafita em forma esferoidal e compacta, o que permite reduzir significativamente a incidência de propagadores de falha em comparação com outras ligas ferrosas que tem estas inclusões em formas mais alongadas. Esta nodularização da grafita no material depende principalmente da composição química e o procedimento de solidificação. As propriedades mecânicas deste tipo de material dependem diretamente destes fatores, o que talvez explique a variação dos valores das propriedades em corpos de provas provenientes de lotes diferentes.

Apesar dos processos de manufatura dos materiais serem padronizados, é recomendável sempre que possível, realizar uma avaliação nas propriedades mecânicas dos materiais adquiridos. A caracterização de materiais tem como função, entre outras, de confirmar as características de resistências oferecidas pelos fabricantes do material. No presente trabalho foi possível observar que, em algumas ocasiões, o material obtido de algumas empresas pode apresentar alguns tipos de imperfeições ou falhas. Estas falhas podem ser oriundas do processo de manufatura e somente podem ser efetivamente definidas a partir da caracterização do material. Neste sentido, recomenda-se que sempre seja realizado a caracterização das propriedades mecânicas toda vez que houver lotes diferentes de materiais da família GGG-40.

Os ensaios realizados sobre o PS e o compósito mostraram resultados satisfatórios ao ser comparados com diferentes fontes bibliográficas. Evidenciando também melhoras na resistência à tração e na rigidez quando o material é reforçado com fibras de celulose do Bagaço de Cana-de-açúcar.

Procurou-se para cada tipo de ensaio mecânico realizar comparações com fontes bibliográficas com a finalidade de verificar se os valores obtidos se encontravam dentro da faixa esperada. Os resultados obtidos pelos ensaios mecânicos se encontram dentro dos intervalos de valores obtidos nas referências bibliográficas, mostrando assim que os procedimentos nos trabalhos experimentais foram realizados dentro das recomendações das normas internacionais.

O sistema de correlação digital de imagem (CDI) se mostrou como uma ferramenta muito eficiente para a avaliação de comportamento do material quando

está sofrendo algum tipo de esforço; sendo capaz de fornecer de forma remota informação sobre o campo de deslocamentos e deformações do material. Este sistema de CDI foi testado com material metálico, polimérico e compósito, mostrando resultados interessantes sobre a influência do reforço no compósito e as melhoras nas suas propriedades mecânicas, ao mesmo tempo em que foram criadas metodologias corretas com a instalação e uso do sistema. Estes resultados foram comparados com fontes bibliográficas do mesmo material, obtendo valores similares para as propriedades mecânicas de tração do material e verificando assim o correto uso do sistema de CDI.

6. PROPOSTA DE CONTINUIDADE E PUBLICAÇÕES ORIGINADAS

A partir deste trabalho foram identificadas algumas informações e avaliações que seria importante adicionar no estudo da caracterização do material GGG 40 e o PS. Assim, são recomendadas a continuação algumas atividades adicionais que poderiam ser realizadas em trabalhos futuros, como proposta de continuidade, continuando com esta linha de pesquisa:

- Realizar ensaios mecânicos secundários ou mais específicos para obter resultados qualitativos e quantitativos sobre outro tipo de esforços no GGG 40 e principalmente no PS.
- Aplicar a técnica de CDI sobre outro tipo de peças mais complexas e submetidas a diferentes esforços.
- Realizar uma análise por elementos finitos modelando uma peça submetida a diferentes esforços dos materiais caracterizados com a finalidade de criar estruturas mais complexas e avaliar o seu comportamento em um modelo a escala.
- No GGG 40, analisar a escala microestrutural a interação da grafita com a matriz e identificar o comportamento que esta experimenta ante os diferentes tipos de esforços.
- Informação termogravimétrica do GGG 40 para temperaturas maiores aos 1350°C com a finalidade de identificar melhor a degradação dos diferentes componentes da liga.

Durante o desenvolvimento do presente trabalho foi originado um artigo enviado para o XIII Congresso Ibero-americano de Polímeros (SLAP) de 2016. O trabalho foi aceito, publicado e apresentado na cidade de Cancun em México.

A publicação conteve o trabalho experimental realizado no PS, evidenciando as melhoras nas propriedades mecânicas do material quando são usadas fibras de celulose do Bagaço de Cana-de-açúcar como reforço na sua estrutura. Da mesma forma que neste trabalho, estas propriedades mecânicas foram avaliadas com ajuda de ensaios mecânicos e a técnica de CDI.

A referência do trabalho apresentado é: RAMIREZ, R. E. R. ; JESUS, L. C. C. ; ANFLOR, C. T. M. ; LUZ, S. M. ; STEIER, V. F. . Digital image correlation applied to the polystyrene reinforced with sugar cane bagasse cellulose fibres. In: XIII Congreso Ibero-americano de Polímeros, 2016, Cancun - Rivera Maya. XIII Congreso Ibero-americano de Polímeros, 2016.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Pan B., Qian K., Xie H., Asundi A. *On errors of digital image correlation due to speckle patterns*. Proceedings of ICEM 2008: International Conference on Experimental Mechanics; 2008 Nov 8; Nanjing, China. SPIE; 2009.
- Peters W. H., Ranson W. F. *Digital imaging techniques in experimental stress analysis*. Optical Engineering. 1982 Jun; 21(3):427–431.
- Ranaivomanana N., Multon S., Turatsinze A. *Basic creep of concrete under compression, tension and bending*. Construction and Building Materials 38 (2013) 173–180. 2013.
- Souza A. M. R., Xavier J., Vaz M., Morais J. J. L., Filipe V. M. J. *Measurement of displacement fields with sub-pixel accuracy by combining cross-correlation and optical flow*. Revista da Associação Portuguesa de Análise de Tensões. 2012; 21:101-109.
- Pan B., Qian K., Xie H., Asundi A. *Two dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review*. Measurement Science and Technology. 2009 Apr; 20(6):1-17.
- Pan B, Huimin X, Wang Z, Qian K, Wang Z. *Study on the subset size selection in digital image correlation for speckle patterns*. Optics Express. 2008 May; 16(10):7037-7048.
- Silva M. L., Ravichandran G. *Combined thermoelastic stress analysis and digital image correlation with a single infrared camera*. Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2011 Nov; 46(8):783-793.
- Bodelot L., Sabatier L., Charkaluk E., Dufrénoy P. *Experimental setup for fully coupled kinematic and thermal measurements at the microstructure scale of*

- an AISI 316L steel. *Materials Science and Engineering A*. 2009 Sep; 501:52-60.
- Çetinarslan C, Karaman S. *Study in the variation of mechanical properties of nodular cast iron depending upon section thickness*. *Mechanical Engineering - DOI*, 2014; 10.1002: 106-113.
 - Karaman S., Çetinarslan C. *Manufacturing process of GGG 40 nodular cast iron*. *Unitech*. 2010 Nov; Gabrovo: 117-122.
 - Guesser W. *Ferro fundido com grafita compacta*. *Metalurgia e Materiais*, 2002 Jun; 403-405.
 - Cintrón R, Saouma V. *Strain Measurements with the Digital Image Correlation System Vic-2D*. 2008 Set; CU-NEES-08-06
 - Frankovský P., Virgala I., Hudák P., Kostka J. *The use the of digital image correlation in a strain analysis*. 2013; 0079(18): 1283-1292.
 - American Society for Testing and Material Standards (ASTM). *ASTM E10: Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*, EUA, 2012.
 - American Society for Testing and Material Standards (ASTM). *ASTM E23: Standard Test Method for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*, EUA, 2012.
 - American Society for Testing and Material Standards (ASTM). *ASTM E8/E8M: Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials*, EUA, 2015.
 - Lecompte D, Sol H, Vantomme J. *Analysis of speckle patterns for deformation measurements by digital image correlation*. *Proceedings of SPIE vol. 6341, Speckle06, From Grains to Flowers*; 2006 Sep 13; Nimmes, France.

- Askeland D. *Ciencia e ingeniería de los materiales*. [S.l.]: International Thomson Editores, 3ª Edición, 2008.
- American Society for Testing and Material Standards (ASTM). *ASTM E140-12b: Standard hardness conversion tables for metals relationship among brinell hardness, vickers hardness, rockwell hardness, rockwell superficial hardness, knoop hardness, and scleroscope hardness*. Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA. 2012.
- American Society for Testing and Material Standards (ASTM). *ASTM E18-15: Standard test methods for rockwell hardness of metallic materials*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- Callister, W. *Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. [S.l.]: LTC, 2002.
- Chiaverini, V. *Aços e Ferros Fundidos*. [S.l.: s.n.]. 7ª Edição. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM). 2002.
- Dedavid B. A., Gomes C. I., Machado G. *Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras*. EdiPUCRS, 2007.
- Dong M. J., PRIOUL C. F. D. Damage effect on the fracture toughness of nodular cast iron: part i. damage characterization and plastic flow stress modeling. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Springer, v. 28, n. 11, p. 2245–2254, 1997.
- Francklin A. R. Um breve estudo sobre ferro fundido nodular. *Centro universitário Estadual da Zona Oeste. RJ*, 2008.
- Sjögren T., Persson P., Vomacka P. *Analysing The Deformation Behaviour of Compacted Graphite Cast Irons Using Digital Image Correlation Techniques*. Engineering Materials Vol. 457. 2011. pp 470-475.

- Hibbeler R. C. *Resistência dos materiais*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall. 7ª Edição. 2010.
- Nan L., xing S. M., bao P. W. Microstructure and mechanical properties of nodular cast iron produced by melted metal die forging process. *Journal of Iron and Steel Research, International*, Elsevier, v. 20, n. 6, p. 58–62, 2013.
- Shackelford J. F. *Ciência dos materiais*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2008.
- Shigley j. E., Mischke C. R. *Projeto de engenharia mecânica*. [S.l.]: Bookman, 2005.
- Souza S. A. D. *Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos*. [S.l.]: E. Blucher, 1982.
- Zhang E. Effect of extrusion processing on the microstructure, mechanical properties, biocorrosion properties and antibacterial properties of ti-cu sintered alloys. *Materials Science and Engineering: C*, Elsevier, v. 69, p. 760–768, 2016.
- Rice J. R. Solid mechanics. School of Engineering and Applied Sciences, and Department of Earth and Planetary Sciences Harvard University, Cambridge, MA 02138 USA. 1994.
- Askeland D., Fulay P., Wright W. *Ciencia e ingeniería de materiales*. [S.l.]: Cengage Learning, 6ª Edición, 2012.
- Pacheco, G. *Análise Numérica e Experimental Em Placa De Material Compósito De Aplicação Na Indústria Automotiva*. Brasília: UnB, 2016. 117 p.
- Colabella L. *Caracterización Mecánica de Paneles de Tipo Honeycomb Construidos com um Material Compuesto*. Argentina. 2011. 107 p.

- Smith W., Hashemi J. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, 4th Edition. 2006.
- Rodrigues J., Martins P. *Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica, Vol. I Fundamentos Teóricos*. Escolar Editora. Lisboa, Portugal. 2005.
- Hayden H. W., Moffat W. G., Wulff J. *The Structure and Properties of Materials. Vol. III*. Wiley. 1965. p 12.
- Haines P. J. *Thermal Methods of Analysis: Principles, Applications and Problems*. London: Chapman and Hall. 1995. 286 p.
- Skoog D. A., Holler F. J., Nieman T. A. *Principios de Análisis Instrumental*. 5ª Edición. Ed. McGraw Hill. Espanha. 2001.
- PerkinElmer. *Thermogravimetric Analysis (TGA) A Beginner's Guide*. PerkinElmer, Inc. 2010.
- Kestemnbach H., Bota Filho W. J. *Microscopia Eletrônica de Transição e Varredura*. São Paulo. Associação Brasileira de Metais. 1994.
- Lopez F. *Fundamentos de Polímeros*. Universidad de Los Andes. Venezuela. 59 p. 2004.
- Ferreira, D. *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: UENF, 2013. 172 p.
- Alberola R. A., De Vecchio R. P., Reygadas C. X., Rhoads L. A. *Eco-estireno "De no Reciclable a Re-utilizable"*. INHUMIC, Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 2014.

- ECOPLAS. *Poliestireno, Características Y Ventajas Respecto Al Medio Ambiente*. Centro de Información Técnica – CIT. 2011.
- Grassi V. G., Forte M. M., Pizzol M. F. *Aspectos Morfológicos e Relação Estrutura-Propriedades de Poliestireno de Alto Impacto*. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 11, nº 3, p. 158-168, 2001.
- Borsoi C., Scienza L. C., Zattera A. J., Angrizani C. C. *Obtenção e Caracterização de Compósitos Utilizando Poliestireno como Matriz e Resíduos de Fibras de Algodão da Indústria Têxtil como Reforço*. *Polímeros*, vol. 21, nº 4, p. 271-279, 2011.
- Sampaio J. A., Andrade M. C., Paiva P. R., Dutra A. J. *Grafita*. *Rochas e Minerais Industriais – CETEM/2005*. 471-478. 2005.
- Djidjelli H., Benachour D. *Effects of Recycling on Mechanical and Thermal Properties of Polystyrene*. *Macromol Symp*. 127. 181-185. (1998).
- Poletto M., Dettenborn J., Zattera A. J., Zeni M. *Avaliação das Propriedades Mecânicas de Compósitos de Poliestireno Expandido Pós-consumo e Serragem de Pinus Elliottii*. *Revista Ibero-americana de Polímeros*. V. 11. (2010).
- American Society for Testing and Material Standards (ASTM). *ASTM D638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, EUA, 2002.
- Correia de Jesus, L. *Obtenção e caracterização de compósitos de poliestireno expandido pós-consumo reforçado com celulose de bagaço de cana-de-açúcar*. Brasília: UnB, 2014. 101 p.
- American Society for Testing and Material Standards (ASTM). *ASTM D3039M, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, vol. 15.03, 1997, USA.

- Santos E., Rojas O., Rosales V. *Acerca del Ensayo de Dureza*. Industrial Data. Res 4.2. 73-80. (2001).
- Garcia A., Spim J.A., dos Santos C. A. *Ensaaios dos materiais*. Rio de Janeiro, LTC, 2000.
- DIN Standards Committee Materials Testing. DIN 50125 Testing of metallic materials - Tensile test pieces. 2004.
- DIN Standards Committee Materials Testing. DIN EN 1563 ductile cast iron grade. 2005
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *ABNT NBR ISO 6892 Materiais metálicos - Ensaio de tração - Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente*. 2013.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *ABNT NBR ISO 6916: Ferro fundido nodular ou ferro fundido com grafita esferoidal*. ABNT/CB-059. 2017.
- Sutton M. A., Wolters W. J., Peters W. H., Ranson W. F., McNeill S. R. *Determination of displacements using an improved digital correlation method. Image and Vision Computing*. 1983 Aug; 1(3):133-139.
- Chu T. C., Ranson W. F., Sutton M. A., Peters W. H. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental Mechanics*. 1985 Sep; 25(3): 232-244.
- Schrier H., Braasch J. R., Sutton M. A. *Systematic errors in digital image caused by intensity interpolation*. *Optical Engineering*. 2000 Nov; 39(11):2915-2921.

- Hooke R. *Conferencias y recopilación de trabajos efectuados por Robert Hooke*. secretario de la Royal Society. 1678.
- Mazzoleni P., Zappa E., Matta F., Sutton M. A. *Thermo-mechanical toner transfer for high quality digital image correlation speckle patterns*. Optics and Lasers in Engineering. 2015 Dec; 75: 72-80.
- Oberg M. *Termoelasticidade: um estudo via método dos elementos de contorno, termografia e correlação digital de imagens*. UnB: 131 p. 2016.
- Barranger Y., Doumalin P., Dupré J. C., Germaneau A. *Digital image correlation accuracy: Influence of kind of speckle and recording setup*. EPJ web of conferences Volume 6 - ICEM 14 – 14th International Conference on Experimental Mechanics; 2010. Poitiers, France.
- The Courier. *The Chinese Scientific Genius, Discoveries and inventions of an ancient civilization*. Multimedia Publications (UK) Ltd. 1988.
- Davis J. R. *Classification and Basic Metallurgy of Cast Irons*. ASM Specialty Handbook Cast Irons. ASM International. 1996.
- Brown J. R. *Foseco Ferrous Foundryman's Handbook*. Ed. Butterworth Heinemann. ISBN 0 7506 4284 X. 2000.
- Dantec Dynamics. *Q-400 Basics of 3D Digital Image Correlation*. Manual of System Q-400 Dantec. 2002.
- TA Instruments. *Thermal Analysis, SDT Q600 Specifications*. P 66-69. TA Instruments. 2010.
- Souza B. V. *Desenvolvimento de Ferro Fundido Austemperado (ADI) em Banho de Zinco-Alumínio*. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2015.

- Derrick S. Polystyrene Recycling. Green Manufacturing Initiative. Western Michigan University. 2010.
- Millis D., Gagnebin P., Pilling B. *Cast ferrous Alloy*. Patente US2485760 A. 1949.

Anexo 1. Tabela com tipos de ferro fundido nodular.

NORMA NODULAR (GRAFITA ESFEROIDAL)						
PROPRIEDADES	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)		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	
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	
DUREZA (HB)	140 - 170	156 - 200	187 - 240	210 - 280	241 - 300	
RESISTÊNCIA TRACÇÃO MIN (MPa)	380	420	500	600	700	
ESCOAMENTO MIN (MPa)	240	280	350	400	450	
ALONGAMENTO MIN (%)	17	12	7	3	2	
MATRIZ PREDOMINANTE	Ferrítica	Ferrítica	Perlitica/ferrítica	Perlitica	Perlitica	