

CLAUDIO ADACHI

ESTUDO DA FRAGILIZAÇÃO AO REVENIDO
DO AÇO LIGA 2,25CR-1MO
ATRAVÉS DO ENSAIO DE INDENTAÇÃO INSTRUMENTADA

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Augusto Santos Torres

Guaratinguetá
2011

A191e	Adachi, Claudio Estudo da fragilização ao revenido em aço liga de 2,25CR-1MO através do ensaio de indentificação instrumentada / Claudio Adachi – Guaratinguetá : [s.n], 2011. 62 f : il. Bibliografia: f. 58-62 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Orientador: Prof. Dr. Marcelo Augusto Santos Torres 1. Aço – propriedades mecânicas I. Título CDU 669.14
-------	---

ESTUDO DA FRAGILIZAÇÃO AO REVENIDO EM AÇO LIGA DE 2,25CR-1MO
ATRAVÉS DO ENSAIO DE INDENTAÇÃO INSTRUMENTADA

CLAUDIO ADACHI

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

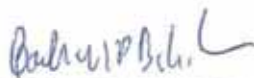
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias
Coordenador

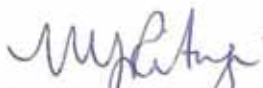
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. MARCELO AUGUSTO SANTOS TORRES
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. CARLOS ANTONIO REIS PEREIRA BAPTISTA
USP-EEL



Prof.ª Dr.ª. MIDORI YOSHIKAWA PITANGA COSTA
UNESP-FEG

Dezembro de 2011

DADOS CURRICULARES

CLAUDIO ADACHI

NASCIMENTO	09.11.1986 – PINDAMONHANGABA / SP
FILIAÇÃO	Mario Toshio Adachi Terezinha Arai Adachi
2003/2005	Curso Técnico Colégio Técnico e Industrial de Guaratinguetá “Prof. Carlos Augusto Patrício Amorim”
2006/2011	Curso de Graduação Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – Universidade Estadual Paulista “Julio Mesquita Filho”

Dedicatória

à minha esposa Patrícia, pelo apoio incondicional,
e aos meus pais Mario e Terezinha, por todo
incentivo ao longo de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha vida, pela minha família, pelos meus amigos e pelas oportunidades proporcionadas para o meu desenvolvimento.

aos meus pais, Mario e Terezinha por me criar, educar, incentivar e sempre serem exemplos na minha vida.

à minha esposa Patrícia pela presença e apoio incondicional durante esse trabalho.

ao Professor Dr. Marcelo Augusto Santos Torres pela orientação e colaboração para realizar este trabalho.

aos meus amigos pelas ajudas para realizar o trabalho.

à Petrobras pela oportunidade e fornecimento de subsídio para realizar este trabalho. Especialmente ao Eng. Anderson Freitas Guimarães, pelos auxílios na realização do trabalho, e ao Eng. Francisco Francelino Ramos Neto que realizou o ensaio de indentação instrumentada e me ajudou no entendimento do ensaio.

Epígrafe

"Você não pode ser qualquer coisa que deseja ser,
mas pode ser tudo que Deus quer que você seja."

Max Lucado

ADACHI, C. **Estudo da Fragilização ao Revenido do Aço 2,25Cr-1Mo através do Ensaio de Indentação Instrumentada**. 2011. 62 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

Os aços ligas 2,25Cr-1Mo são largamente utilizados em equipamentos de plantas petroquímicas que trabalham em condições de elevadas temperaturas, por apresentar boas características mecânicas nessas condições. Porém esse aço, quando exposto por longo tempo a elevadas temperaturas, na faixa de 343 °C a 593 °C, pode apresentar o fenômeno de fragilização ao revenido. O componente *stripper* do conjunto conversor da unidade de craqueamento catalítico de leito fluidizado (UFCC) da planta estudada é fabricado com esse material, estando sujeito à fragilização ao revenido. O fenômeno da fragilização ao revenido refere-se à perda progressiva da tenacidade, tornando o material frágil. Com a fragilização os equipamentos, fabricados com esse material, estão sujeitos à ocorrência de uma fratura frágil em situações de parada e partida dos mesmos, podendo ocasionar falhas catastróficas. Por esta razão, este trabalho estuda se há uma degradação do material quanto ao fenômeno de fragilização ao revenido. Para verificar a fragilização do material é convencionalmente utilizado o ensaio de impacto. Porém esse ensaio exige a remoção de amostras do material para a fabricação de corpos-de-prova. Este fato torna-se crítico quando se trata de componentes estruturais de um equipamento. Por isso, o presente trabalho estuda também um ensaio não-destrutível capaz de ser executado *in-situ*, chamado de indentação instrumentada, como alternativa de detecção da atividade do fenômeno no componente *stripper*, através de comparações das propriedades mecânicas obtidas com os ensaios mecânicos convencionais em amostras similares.

PALAVRAS-CHAVE: Fragilização ao revenido, indentação instrumentada, aço 2,25Cr-1Mo, propriedades mecânicas.

ADACHI, C. **Study of Temper Embrittlement of 2,25Cr-1Mo Steel by Instrumented Indentation Test**. 2011. 62 f. Monograph (Undergraduate Work in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

2,25Cr-1Mo alloy steels are widely used in petrochemical plant equipments working in high temperature conditions because of their good mechanical proprieties in these conditions. Although, when exposed for a long time at high temperature, in the rage of 343 °C to 593 °C, may present the temper embrittlement phenomenon. The component named stripper of assembly converter of fluid catalytic cracking unit (UFCC) of studied plant is manufactured using this material, which is subject to temper embrittlement. The phenomenon of temper embrittlement refers to progressive lose of toughness, making the material brittle. With embrittlement, equipments manufactured with this material are under risks to suffer brittle fracture in the cool down and start-up situations of them, which can cause catastrophic failures. By this reason, this research studies presence of temper ebrittlement phenomenon on this material. To verify the toughness of the material is conventionally used charpy V-notch test. However, this test requires the removing of samples of the material to make specimens. This fact becomes critical when talk about structural components of an equipment. So, this research also studies a non-destructive test that can be executes in-situ, known as instrumented indentation, as an alternative detection of the phenomenon at the component stripper, by comparative of the mechanical proprieties obtained by conventional tests in similar samples.

KEYWORDS: Temper embrittlement, instrumented indentation, 2,25Cr-1Mo steel, mechanical proprieties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fratura Frágil no Riser da RPBC - Petrobras (PALFI <i>et al.</i> , 1998)	15
Figura 2 – Representação Esquemática dos Processos e Produtos de uma Refinaria (GUIMARÃES; NASCIMENTO, 2006)	18
Figura 3 – Vista Geral da Unidade de Craqueamento Catalítico em Leito Fluidizado (UFCC) da REVAP (RAMOS NETO; GUIMARÃES, 2011).....	19
Figura 4 – Desenho Esquemático do Conjunto Conversor da REVAP (GUIMARÃES; NASCIMENTO, 2006).....	20
Figura 5 – Influência do Fator J na Temperatura de Transição Dúctil-Frágil (SOTELO, 2011)	25
Figura 6 – Perfil de Indentação Típico deixado por um Penetrador Esférico (RAMOS NETO <i>et al.</i> , 2003).....	27
Figura 7 – Representação Gráfica de alguns Ciclos de Indentação relacionando a Carga e o Deslocamento do Indentador (RAMOS NETO <i>et al.</i> , 2003)	28
Figura 8 – Ilustração da Determinação da Profundidade de Fratura (adaptado de MURTY <i>et al.</i> , 1998).....	33
Figura 9 – Local da Retirada das Amostras do Suporte do Chapéu Chinês (GUIMARÃES; NASCIMENTO, 2006).....	35
Figura 10 – Amostras 1, 2 e 3 do Suporte do Chapéu Chinês (ADACHI, 2011)	36
Figura 11 – Amostra 4 do Suporte do Chapéu Chinês (ADACHI, 2011)	36
Figura 12 – Máquina de Dureza Heckert da REVAP – Petrobras (ADACHI, 2011)	39
Figura 13– Corpo-de-prova para Ensaio de Impacto Charpy (viga simples) (ASTM A370, 2009).....	40
Figura 14 – Sentido de Remoção dos Corpos-de-prova das Amostras 1, 2 e 3 (adaptada da Figura 10) (ADACHI, 2011)	41
Figura 15 – Sentido de Remoção dos Corpos-de-prova da Amostra 4 (adaptada da Figura 11) (ADACHI, 2011).....	41
Figura 16 – Geometria do Corpo-de-prova para Ensaio de Tração (ASTM A370, 2009)	42

Figura 17 – Equipamento Utilizado para Realizar o Ensaio de Indentação Instrumentada <i>in-situ</i> (RAMOS NETO; GUIMARÃES, 2011)	43
Figura 18 – Comparativo das Durezas Preliminares das Amostras do Suporte do Chapéu Chinês (ADACHI, 2011).....	47
Figura 19 – Regressão Linear para Conversão de Dureza Rocwell C (HRC) para Brinell (HB) (ADACHI, 2011)	48
Figura 20 – Comparativo de Dureza das Amostras do Suporte do Chapéu Chinês (ADACHI, 2011).....	49
Figura 21 – Comparativo da Energia Absorvida das Amostras do Suporte do Chapéu Chinês (ADACHI, 2011)	51
Figura 22 – Comparativo dos Resultados dos Ensaios Convencionais com os Resultados dos Ensaio de Indentação Instrumentada (ADACHI, 2011)	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição Química do Aço Liga 2,25Cr-1Mo segundo a norma ASTM A 387 (1999)	22
Tabela 2 – Propriedades Mecânicas do Aço Liga 2,25Cr-1Mo segundo a norma ASTM A 387 (1999)	23
Tabela 3 – Dimensões do corpo-de-prova padrão para ensaio de tração (ASTM A370, 2009)	42
Tabela 4 – Composição Química do Material do Costado do Stripper	45
Tabela 5 – Valores dos Fatores J e X da Amostra do Suporte do Chapéu Chinês	45
Tabela 6 – Resultados dos Ensaio de Dureza Preliminar das Amostras do Suporte do Chapéu Chinês	46
Tabela 7 – Resultados dos Ensaio de Dureza das Amostras do Suporte do Chapéu Chinês ..	47
Tabela 8 – Resultados dos Ensaio de Dureza das Amostras do Suporte do Chapéu Chinês Convertida para Dureza Brinell (HB)	48
Tabela 9 – Resultados dos Ensaio de Impacto Charpy das Amostras do Suporte do Chapéu Chinês a Temperatura Ambiente [Joule].....	50
Tabela 10 – Resultados dos Ensaio de Tração a Temperatura Ambiente	52
Tabela 11 – Resultados dos Ensaio de Tração a Quente (550 °C)	53
Tabela 12 – Resultados dos Ensaio de Indentação Instrumentada.....	54

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Estrutura do Trabalho	14
1.2	Justificativa.....	14
1.3	Objetivos	16
1.3.1	Objetivo Geral	16
1.3.2	Objetivos Específicos	17
2.	REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1	Unidade de Craqueamento Catalítico.....	18
2.2	Aços 2,25Cr-1Mo.....	22
2.3	Fragilização ao Revenido	23
2.4	Indentação Instrumentada	26
2.4.1	Definição	26
2.4.2	Propriedades Mecânicas	28
2.4.2.1	Limite de Escoamento	29
2.4.2.2	Limite de Resistência	29
2.4.2.3	Energia Absorvida	31
2.4.2.4	Dureza	34
2.4.3	Instrumentação e Controle.....	34
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	Material Estudado	35
3.2	Análise Química.....	37
3.3	Tratamento Térmico	37
3.4	Caracterização Mecânica.....	38
3.4.1	Ensaio de Dureza	38

3.4.2	Ensaio de Impacto	40
3.4.3	Ensaio de Tração a Temperatura Ambiente	42
3.4.4	Ensaio de Tração a Quente	42
3.4.5	Ensaio de Indentação Instrumentada	43
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	Análise Química	45
4.2	Caracterização Mecânica.....	46
4.2.1	Ensaio de Dureza	46
4.2.2	Ensaio de Impacto	50
4.2.3	Ensaio de Tração a Temperatura Ambiente	52
4.2.4	Ensaio de Tração a Quente	53
4.2.5	Ensaio de Indentação Instrumentada	54
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1. INTRODUÇÃO

1.1 Estrutura do Trabalho

Neste capítulo, é descrita a justificativa para a realização do trabalho, com uma breve introdução sobre os assuntos. Também são mostrados os objetivos do trabalho.

No capítulo 2 são apresentados assuntos relacionados a esse trabalho, abordando os temas: unidade de craqueamento catalítico, aços 2,25Cr-1Mo, fragilização ao revenido e indentação instrumentada.

No capítulo 3 é apresentado um exemplo de antecedente do problema da fragilização ao revenido em aço liga 2,25Cr-1Mo.

No capítulo 4 são definidos os materiais e os métodos utilizados.

No capítulo 5 são mostrados os resultados e suas análises dos mesmos.

No capítulo 6 são feitas as conclusões.

1.2 Justificativa

A unidade de craqueamento catalítico de leito fluidizado (UFCC) da Refinaria Henrique Lage – REVAP, situada na cidade de São José dos Campos no estado de São Paulo, tem como função o processamento de 14.000 m³ por dia de gasóleo, hidrocarboneto pesado resultante da destilação do petróleo, através de reações de craqueamento ativado por catalisadores a base de óxido de alumínio e sílica, transformando-o em hidrocarbonetos mais leves, como o gás liquefeito de petróleo (GLP) e gasolina. Desta forma, esta unidade tem importância estratégica e comercial para a refinaria, pois é diretamente responsável pela transformação do produto menos valorizado comercialmente para um produto de maior demanda e valor no mercado de combustíveis (GUIMARÃES; NASCIMENTO, 2006).

O conjunto conversor da REVAP, sendo o principal equipamento da UFCC, é constituído basicamente pelos seguintes componentes: *riser*, vaso separador, *over-head*, *stripper* e vaso regenerador. A maioria deles são fabricados por chapas de aço carbono (ASTM A-516, Gr. 70) revestidas internamente de material refratário anti-erosivo classe “A”.

O *stripper*, no entanto é fabricado pelo aço liga 2,25Cr-1Mo (ASTM A-387, Gr. 22), por ser um componente interno do equipamento, com as duas paredes em contato com os produtos a elevadas temperaturas. Já os componentes constituídos de aço carbono possuem uma das paredes em contato com o ambiente externo (GUIMARÃES; NASCIMENTO, 2006).

Os aços de baixa liga cromo e molibdênio são altamente utilizados para equipamentos de indústrias de petróleo e petroquímicas, que trabalham com elevadas temperaturas de operação. Um dos problemas de integridade física do equipamento que surge quando trabalha com esse material a elevadas temperaturas é a fragilização ao revenido, que tem causado prejuízos às indústrias. O fenômeno se refere à perda progressiva de tenacidade do material, em decorrência do tempo de exposição à alta temperatura, tornando-se um material “frágil”, quando em baixa temperatura (ZUMPARO, 2003).

O conjunto conversor da unidade de craqueamento catalítico da refinaria de Cubatão (RPBC – Refinaria Presidente Bernardes) da Petrobras possui os componentes *riser*'s fabricados em aço liga 2,25Cr-1Mo. Na parada de manutenção da unidade em março/maio de 1988, após aproximadamente 15 anos de operação, estava planejado a substituição de uma junta de expansão em um dos *riser*'s. Para realizar esta substituição foram utilizados quatro macacos hidráulicos para suportar o componente. Ao posicionar o último macaco hidráulico e iniciar a ajustagem do mesmo, ocorreu uma ruptura frágil em vários pontos do componente. Uma das fraturas é mostrada na Figura 1 (PALFI *et al.*, 1988).



Figura 1 – Fratura Frágil no Riser da RPBC - Petrobras (PALFI *et al.*, 1988)

Para a análise da falha, foram realizados ensaios de impacto *Charpy*, onde foram constatados baixa energia de absorção no material fraturado (média de 15 J). A análise concluiu que a causa básica da fratura foi tenacidade extremamente baixa do material causada pela fragilização ao revenido e precipitação de carbonetos no contorno de grão (SILVA *et al.*, 1988).

As propriedades mecânicas do material, convencionalmente, são obtidas por ensaios de dureza, tração e impacto. Porém, esses ensaios, exceto o de dureza, provocam impreterivelmente a destruição dos corpos de prova retirados de equipamentos ou peças em estudo, o que não é vantajoso ou aplicável para equipamentos e peças que vão operar novamente. Por isso, torna-se necessário uma técnica que permita avaliar as características mecânicas do material *in-situ* e sem danos que impeçam o retorno dos equipamentos ou peças à operação (RAMOS NETO, 2003).

Hoje é possível obter as propriedades mecânicas do material através de ensaios de macroindentação. Esse ensaio permite sua realização na própria estrutura do equipamento ou peça, não provocando danos a eles, permitindo a sua reutilização. Uma variação deste ensaio com o monitoramento das variáveis de carga e deslocamento é chamado de indentação instrumentada (RAMOS NETO, 2003).

Desta forma, utilizando o ensaio de indentação instrumentada e comparando os resultados com os obtidos com ensaios mecânicos convencionais, permite avaliar o avanço do mecanismo de fragilização ao revenido. E dando subsídios para o planejamento da manutenção do equipamento, antecipando a falha do mesmo (GUIMARÃES; NASCIMENTO, 2006).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo do trabalho é propor uma metodologia de avaliação das propriedades mecânicas do componente *in-situ*, substituindo os ensaios destrutivos convencionais pelo ensaio de indentação instrumentada. Assim, avaliando se o componente fabricado em aço 2,25Cr-1Mo está com o mecanismo de dano de fragilização ao revenido em atividade.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Estudo do mecanismo de fragilização ao revenido.
- Estudo do ensaio de indentação instrumentada e comparação com os ensaios de dureza, impacto (*Charpy*) e tração.
- Verificar a aplicabilidade do ensaio para a avaliação do mecanismo de fragilização ao revenido no aço 2,25Cr-1Mo.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Unidade de Craqueamento Catalítico

A primeira unidade em uma refinaria de petróleo é a unidade de destilação atmosférica onde ocorre o fracionamento dos produtos da primeira destilação do petróleo. Os produtos a base de hidrocarbonetos mais leves gerados nessa unidade são tratados através de unidades de hidrotreatamentos e especificados para serem comercializados. Porém, os produtos a base de hidrocarbonetos mais pesados não são comercializados, pois não possuem importância e valor comercial. Por isso, um dos produtos a base de hidrocarbonetos pesados, o gasóleo, é enviado para a unidade de craqueamento catalítico (GUIMARÃES; NASCIMENTO, 2006).

Na Figura 2 é mostrado um fluxograma com os principais processos de uma refinaria e seus produtos.

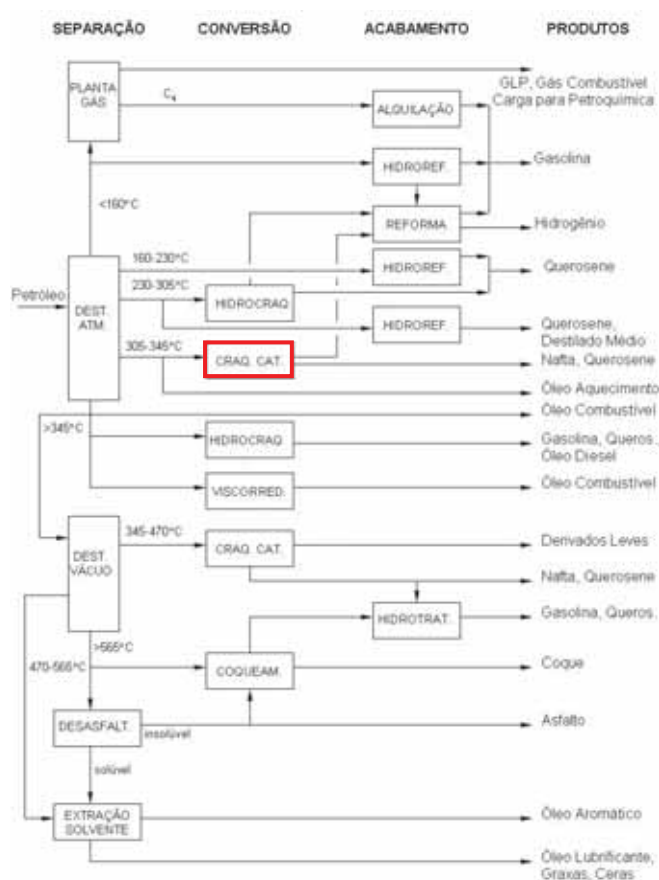


Figura 2 – Representação Esquemática dos Processos e Produtos de uma Refinaria (GUIMARÃES; NASCIMENTO, 2006)

A unidade com o processo de craqueamento catalítico em leito fluidizado (FCC) vem sendo importante para a estratégia comercial das refinarias de petróleo, visto que é dada uma alta demanda por frações mais leves advindas do petróleo. Esta unidade traz a tecnologia de reaproveitamento do gasóleo, transformando-o em produtos com maior valor comercial, como a gasolina e o GLP (gás liquefeito de petróleo). Isso objetiva suprir o déficit da produção dos mesmos, suplementando a diferença de produção entre a destilação do petróleo e a requerida pelo mercado (PEREIRA NETO; ALVES, 2011). O gasóleo pode ser obtido: como produto da unidade de destilação atmosférica de petróleo; da unidade de destilação a vácuo, através do resíduo da destilação atmosférica; e da unidade de coqueamento, através do fracionamento do resíduo da destilação à vácuo. A unidade de craqueamento catalítico da REVAP, mostrado na Figura 3, tem uma capacidade de processamento de 14.000 m³ de gasóleo por dia (GUIMARÃES; NASCIMENTO, 2006).



Figura 3 – Vista Geral da Unidade de Craqueamento Catalítico em Leito Fluidizado (UFCC) da REVAP (RAMOS NETO; GUIMARÃES, 2011)

Dentre os vários equipamentos presentes na unidade de craqueamento catalítico, o conjunto conversor é o principal, pois é nele que ocorre a quebra das cadeias dos hidrocarbonetos pesados. Na Figura 4 é apresentado o desenho esquemático do conjunto

conversor da REVAP, indicando os principais componentes. O monóxido de carbono (CO) gerado na regeneração dos catalisadores é reaproveitado em uma caldeira a base da queima do monóxido de carbono. Com a realização da queima completa do gás, transforma-o em dióxido de carbono (CO_2), para não liberar o monóxido de carbono diretamente ao meio ambiente (GUIMARÃES; NASCIMENTO, 2006).

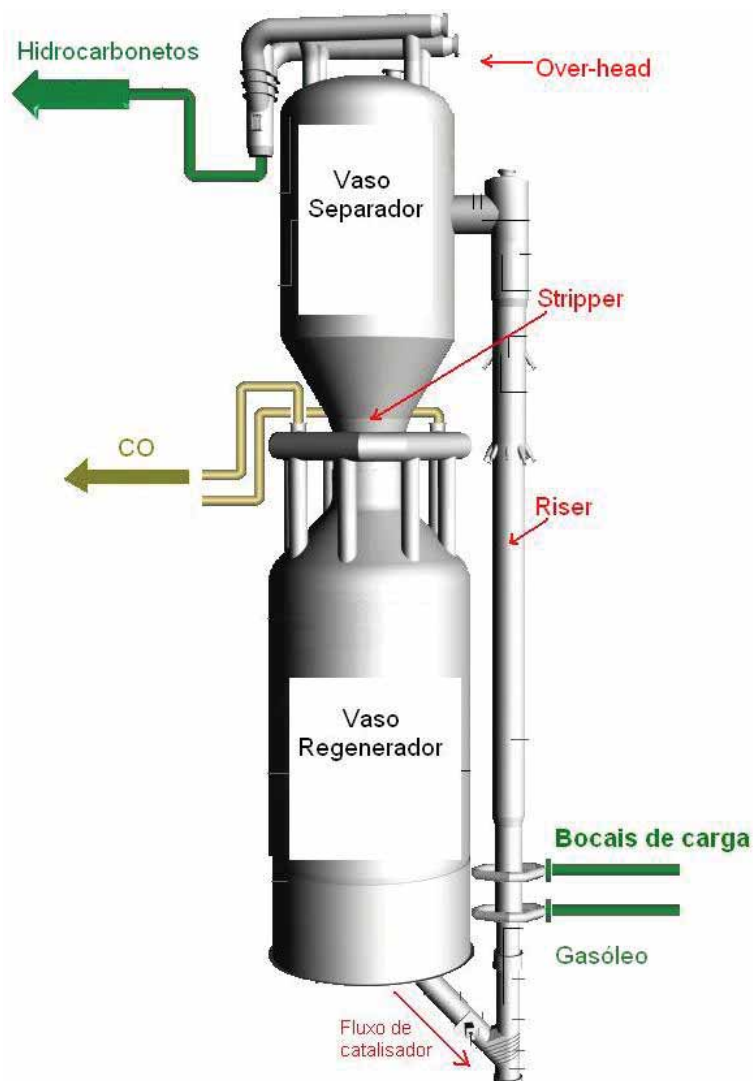


Figura 4 - Desenho Esquemático do Conjunto Conversor da REVAP (GUIMARÃES; NASCIMENTO, 2006)

A seguir são apresentadas as definições de um processo de craqueamento catalítico segundo Sadeghbeigi (2000).

O conjunto conversor é o coração do FCC. A carga (gasóleo) pré-aquecida é injetada no *riser* próximo à base do equipamento, onde entra em contato com o catalisador regenerado numa proporção aproximada entre 1:4 a 1:9 em peso. O calor absorvido pelo catalisador no regenerador é o suficiente para fornecer a energia de aquecimento da carga e atingir a temperatura da reação, pois trata-se de uma reação endotérmica (SADEGHBEIGI, 2000).

O *riser* é uma tubulação vertical revestida internamente com refratário anti-erosivo. As reações catalíticas ocorrem na fase vapor dentro do *riser* e iniciam-se assim que a carga é vaporizada. Para isso, é comumente injetado vapor no processo para atomizar a carga e aumentar o contato com o catalisador. A principal força motriz para que o catalisador suba pelo *riser* é a expansão volumétrica dos vapores gerados na reação (SADEGHBEIGI, 2000).

Após a reação de craqueamento catalítico no *riser*, o catalisador e o vapor de hidrocarboneto entram no vaso separador. Esse é formado por vários ciclones que tem como objetivo realizar a separação dos catalisadores através de uma separação inercial, podendo ser constituído de uma ou duas etapas. Os hidrocarbonetos misturados com o vapor que saem do vaso separador são direcionados para o *over-head*, que realiza a captação desta mistura, e posteriormente para a torre de fracionamento para separação dos hidrocarbonetos (SADEGHBEIGI, 2000).

Os catalisadores gastos separados dos vapores de produtos caem no *stripper*, bem como os vapores que são arrastados pelos catalisadores. Porém, os hidrocarbonetos são adsorvidos na superfície do catalisador e os vapores de hidrocarbonetos preenchem os poros do catalisador. Por isso, é injetado vapor para remover os hidrocarbonetos arrastados pelos catalisadores e enviá-los para o *over-head*. Mesmo assim não é possível remover na totalidade os hidrocarbonetos dos poros do catalisador (SADEGHBEIGI, 2000).

O catalisador gasto do *stripper* é encaminhado para o vaso regenerador. Esse tem como objetivo restaurar a atividade do catalisador e posteriormente fornecer calor para a carga. O catalisador gasto é acompanhado de coque, o mesmo é eliminado por uma reação de combustão com injeção de ar através de sopradores e anéis de ar. Com o calor gerado pela combustão é possível manter o leito catalítico fluidizado. Após todos esses processos, é iniciado novamente o ciclo de craqueamento (SADEGHBEIGI, 2000).

2.2 Aços 2,25Cr-1Mo

Os processos petroquímicos vêm exigindo, cada vez mais, materiais que trabalhem em condições muito severas com capacidade de resistir à oxidação, corrosão e temperaturas elevadas (SILVA TELLES, 2003). Os reatores fabricados no Brasil geralmente seguem o código de projeto ASME seção VIII para vasos de pressão. Atualmente, dentre os materiais disponíveis no mercado, a chapa de o aço liga 2,25Cr-1Mo, fabricado pela especificação ASTM A 387 grau 22 classe 2, é o material mais utilizado para aplicações em elevadas temperaturas (ZUMPANO, 2003).

Na Tabela 1 é apresentada a composição química da chapa de aço liga 2,25Cr-1Mo, fabricado pelo processo de laminação, exigida pela norma ASTM A 387 (1999).

Na Tabela 2 são apresentadas as tolerâncias das propriedades mecânicas exigidas pela norma ASTM A 387 (1999) para a fabricação do aço liga 2,25Cr-1Mo.

Tabela 1 – Composição Química do Aço Liga 2,25Cr-1Mo segundo a norma ASTM A 387 (1999)

Elemento	Símbolo	Composição, %
Carbono	C	0,04 – 0,15
Manganês	Mn	0,25 – 0,66
Fósforo, máx.	P	0,035
Enxofre, máx.	S	0,035
Silício, máx.	Si	0,5
Cromo	Cr	1,88 – 2,62
Molibdênio	Mo	0,85 – 1,15

Tabela 2 – Propriedades Mecânicas do Aço Liga 2,25Cr-1Mo segundo a norma ASTM A 387 (1999)

Material	Limite de Resistência [MPa]	Limite de Escoamento mín. [MPa]	Alongamento mín. [%]
ASTM A 387 Gr22 Classe 1	415 a 585	207	18
ASTM A 387 Gr22 Classe 2	515 a 690	310	18

O aço liga 2,25Cr-1Mo possui boa resistência mecânica, bons resultados para tratamentos térmicos em elevadas espessuras e o molibdênio confere ao mesmo uma boa resistência ao trabalho a quente (KESSLER, 2000). Além disso, possui alta condutividade térmica, baixo coeficiente de expansão térmica e é economicamente favorável, quando comparado sua tensão de escoamento com seu custo. A alta condutividade térmica é essencial para equipamentos de troca térmica e o baixo coeficiente de dilatação é uma das principais características exigidas para equipamentos que operam com ciclos térmicos (ASM HANDBOOK, 1990).

2.3 Fragilização ao Revenido

A fragilização ao revenido, também conhecido, segundo ASM Handbook (1990) como fragilidade ao revenimento, fragilização ao revenido em duas etapas ou fragilização ao revenido reversível é um fenômeno metalúrgico em que ocorre a perda progressiva de tenacidade dos aços liga com longo tempo de exposição às condições de aquecimento isotérmico ou resfriamento lento dentro de uma faixa de temperatura de susceptibilidade (ZUMPANO, 2003). Assim, muitos componentes em boas condições operacionais tornam-se candidatos a serem sucateados (VISWANATAN, 1989). A faixa de temperatura de susceptibilidade ao fenômeno para os aços 2,25Cr-1Mo, segundo o API RP 579 (2000) é entre 343 °C e 593 °C.

Este fenômeno não ocorre em aços carbono, somente em aços liga, e mesmo nestes aços, o grau de fragilização varia de acordo com os elementos de impurezas presentes no material e com as suas combinações, agravados mais ainda com a presença de impurezas

(ASM HANDBOOK, 1990). Os materiais susceptíveis a este fenômeno são aços de baixa liga com apreciáveis concentrações dos seguintes elementos de liga: manganês (Mn), níquel (Ni) ou Cromo (Cr) e com adição de um ou mais dos seguintes elementos considerados como impurezas facilitadores da fragilização: antimônio (Sb), fósforo (P), arsênio (As) e estanho (Sn) (CALLISTER, 2002). Quantidades mínimas destes elementos facilitadores de fragilização, da ordem de 0,01 %, são suficientes para causar a fragilização ao revenido (WATANABE *et al.*, 1974). Por isso, atualmente, as aciarias buscam desenvolver na fabricação de aços Cr-Mo processos que proporcionem maior pureza ao material (ECKSTEIN, 2009).

O fenômeno de fragilização ao revenido, em plantas petroquímicas ocorre em duas etapas. Primeiramente, as partículas de carbeto que se localizam nos contornos de grão aumentam de tamanho, facilitando a nucleação de vazios. Em seguida as impurezas, com a elevada temperatura, difundem rapidamente para os contornos de grão saturando-os (BHADESHIA *et al.*, 1997).

Além dos elementos considerados como impurezas, como o antimônio, fósforo, arsênio e estanho, alguns elementos que fazem parte da composição do material, como o cromo, o manganês e o silício, podem aumentar a segregação da impureza nos contornos de grão, assim aumentando a fragilização ao revenido (HERTZBERG, 1996).

Para que a susceptibilidade ao fenômeno do material base fosse avaliada através da composição química do material, e assim podendo eliminar os riscos da fragilização ao revenido durante a operação de um equipamento, Watanabe *et al.* (1980) definiram o fator J, conforme a seguinte fórmula:

$$J = (Si + Mn) \times (P + Sn) \times 10^4 \text{ (\% em massa)} \quad (1)$$

Segundo Ekstein (2009), o fator J avalia a influência das impurezas fósforo e estanho, consideradas as mais críticas, e mostra que os elementos manganês e silício amplificam o fenômeno, atuando como catalisadores.

A Figura 5 mostra a influência do fator J na temperatura de transição dútil-frágil em aços liga 2,25Cr-1Mo.

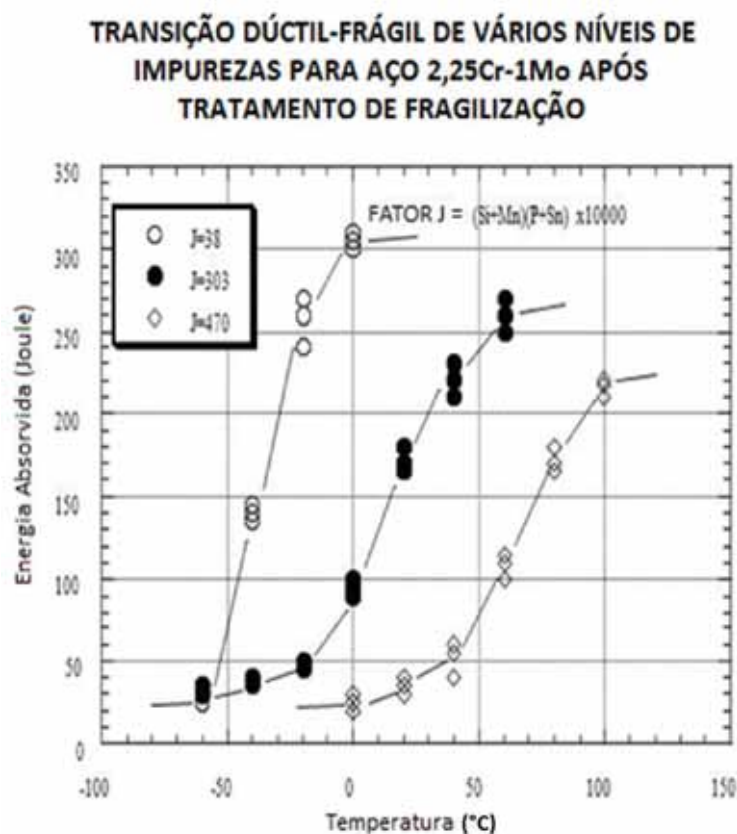


Figura 5 – Influência do Fator J na Temperatura de Transição Dúctil-Frágil (SOTELO, 2011)

Segundo Bruscato (1970), a susceptibilidade ao fenômeno no material metálico depositado em solda, pode ser avaliada somente pelos elementos contribuintes ao fenômeno e considerados como impurezas, elaborando o “*Bruscato Parameter – X*”, conhecido como fator X, conforme a seguinte fórmula:

$$X = (10P + 4\text{Sn} + 5\text{Sb} + \text{As}) / 100 \text{ (ppm)} \quad (2)$$

Os valores dos fatores J e X comumente aceitos como referência para eliminar o risco da fragilização ao revenido, segundo o API RP 571 (2003), são, no máximo, 100 e 15, respectivamente. Além desses fatores, é determinado também que limitando o valor da soma dos elementos fósforo (P) e estanho (Sn) em valores menores que 0,01 %, em porcentagem de massa, é suficiente para minimizar o fenômeno.

Com a fragilização ao revenido, o tipo de fratura que era por clivagem em aços não fragilizados muda para fratura intergranular (ZUMPANO, 2003). A segregação das impurezas ao contorno de grão aumenta com o tempo de exposição do material à temperatura de susceptibilidade, assim a fratura ocorre cada vez mais em temperaturas mais altas, causando o

aumento da temperatura de transição dúctil-frágil (ZUMPANO; FERREIRA, 2004). A importância de realizar o ensaio de impacto a temperaturas ambientes deve-se ao risco da temperatura de transição dúctil-frágil, após a fragilização ao revenido, alcançar uma temperatura próxima da temperatura ambiente (ZUMPANO, 2003). Apesar da temperatura de transição aumentar com o grau da fragilização ao revenido, o patamar superior e o patamar inferior da curva de energia absorvida, obtida através de ensaios de impacto, não são afetados (BUSCEMI *et al.*, 1991).

O fenômeno da fragilização ao revenido pode aumentar o risco de falha do material por fadiga e por corrosão sob tensão, aumentando a taxa de crescimento das trincas (ASM HANDBOOK, 1990).

Para que o fenômeno de fragilização ao revenido seja revertido, têm-se adotado o método de tratamento térmico de revenimento com temperatura acima de 620 °C, seguido de resfriamento rápido (GUIMARÃES, 2011).

2.4 Indentação Instrumentada

2.4.1 Definição

A caracterização mecânica dos materiais através da obtenção de propriedades mecânicas é de fundamental importância para avaliação do estágio da degradação do material, para garantir que falhas não ocorram e estimar a vida remanescente para o componente. Para a caracterização mecânica dos materiais são bastante utilizados, convencionalmente, os ensaios destrutivos como tração e impacto para esse fim. Porém, as grandes limitações desses ensaios são: não poderem ser realizados *in-situ* e a necessidade de retirar amostras para confecção de corpos-de-prova, podendo comprometer a integridade do componente (RAMOS NETO, 2003).

O ensaio de macroindentação é uma técnica que permite a realização do ensaio na própria estrutura do componente, uma vez que a região afetada pelo mesmo é bastante reduzida (RAMOS NETO, 2003).

Este ensaio é baseado na múltipla indentação controlada em uma superfície visando obter as propriedades mecânicas do material através da medição da resistência à penetração

do material analisando a deformação ocorrida com a teoria da elasto-plasticidade (SOUSA; SOARES; FRANCO, 2008). A múltipla indentação é realizada com a finalidade de obter várias respostas do material em diferentes níveis de deformação, possibilitando obter vários resultados das propriedades mecânicas do material. Por fim, obter um resultado final consistente através da média dos resultados (RAMOS NETO; GUIMARÃES, 2011).

Quando o ensaio de macroindentação é executado com o monitoramento das variáveis de deslocamento e carga é chamado de Macroindentação Instrumentada (HAGGAG; NANSTAD; BRASKI, 1989).

Ramos Neto e Franco (2002), com a utilização de penetrador esférico, definem como Indentação Esférico-Instrumentada (IEI). Este método é baseado em multiplas indentações, com carregamento e descarregamento da carga, no mesmo local de ensaio, utilizando uma esfera metálica de Carboneto de Tungstênio-Cobalto (WCCo) com de elevada dureza como penetrador. Na Figura 6 é ilustrada a marca da indentação deixado pelo penetrador, o diâmetro plástico (d_p) e diâmetro total (d_t), e representadas as deformações elástica (h_e), plástica (h_p) e total (h_t).

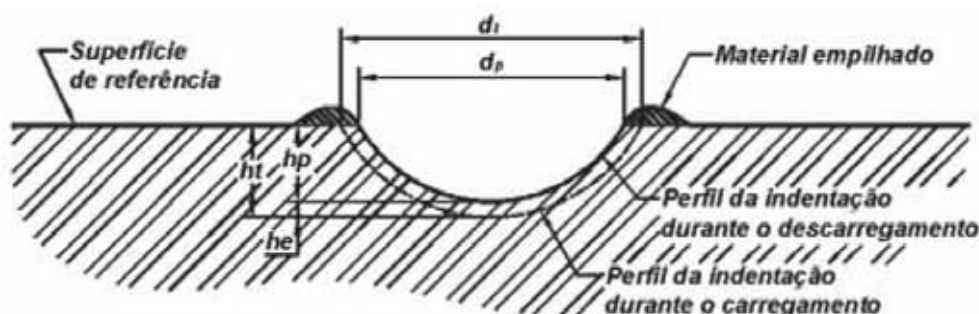


Figura 6 – Perfil de Indetação Típico deixado por um Penetrador Esférico (RAMOS NETO *et al.*, 2003)

Com a realização deste ensaio é possível levantar uma curva correlacionado a carga aplicada no ensaio e a deformação do material, como mostrado na Figura 7. Através das informações de tensão e deformação obtidas pelo gráfico e utilizando equações-modelo, consegue-se determinar as propriedades mecânicas do material ensaiado, como o limite de resistência, limite de escoamento, dureza e energia à fratura estimada (HAGGAG *et al.*, 1989).

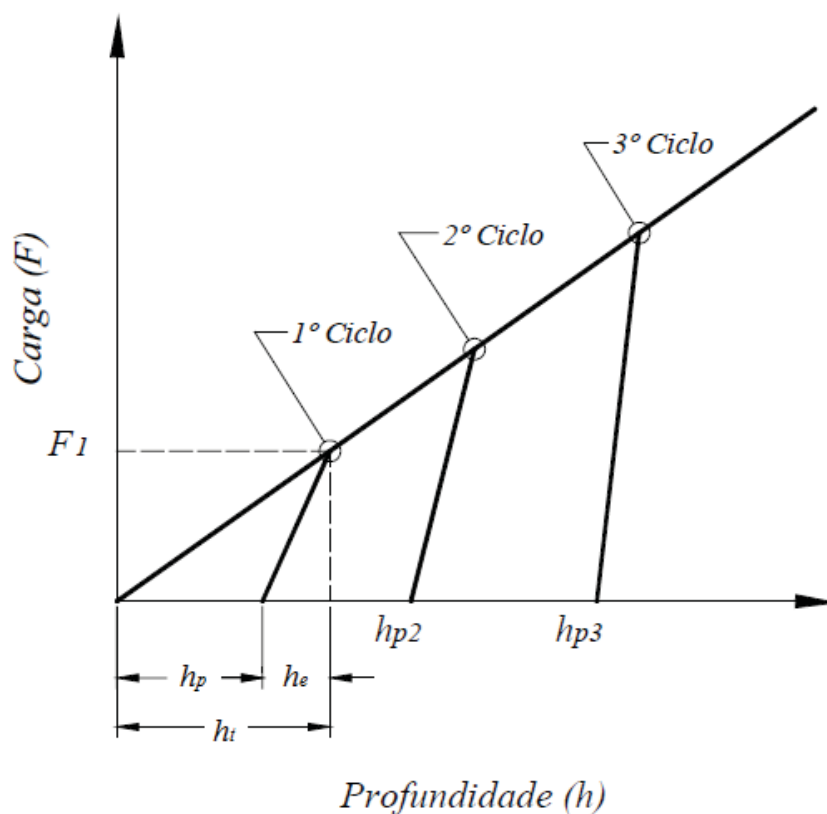


Figura 7 – Representação Gráfica de alguns Ciclos de Indentação relacionando a Carga e o Deslocamento do Indentador (RAMOS NETO *et al.*, 2003)

2.4.2 Propriedades Mecânicas

Tabor (1951) foi o pioneiro a relacionar a dureza e a deformação causada pelo penetrador esférico com o teste de tração uniaxial. Segundo Sousa, Soares e Franco (2008), esta correlação é baseada em três premissas:

- 1 - Curva de tensão verdadeira x deformação obtida no ensaio de tração é razoavelmente semelhante à obtida no ensaio de compressão;
- 2 - Deformação plástica verdadeira do ensaio de tração uniaxial correlaciona-se à deformação da indentação;
- 3 - Tensão de escoamento no ensaio uniaxial de tração correlaciona-se à pressão média da indentação esférica.

Através das premissas acima, Sousa, Soares e Franco (2008) e Murty *et al.* (1998) determinaram equações para estimar algumas propriedades mecânicas, como o limite de

escoamento, o limite de resistência e a energia absorvida pelo material. Os equacionamentos das propriedades são descritas a seguir.

2.4.2.1 Limite de Escoamento

Através do gráfico da Figura 7, é possível obter o valor da deformação total (h_t), que é mensurada durante a aplicação da carga. A deformação total pode ser convertida em diâmetro total da indentação (d_t), conforme equação a seguir:

$$d_t = 2 \cdot \sqrt{D \cdot h_t - h_t^2} \quad (3)$$

onde D é o diâmetro da esfera do indentador.

Os pontos obtidos nos ciclos de carregamento, conforme o gráfico da Figura 7, são ajustados numa regressão linear, conforme equação a seguir:

$$\frac{F}{d_t^2} = A \left(\frac{d_t}{D} \right)^{m-2} \quad (4)$$

onde F é a carga aplicada no ensaio, A é o parâmetro do material obtido na regressão linear e m é o coeficiente de Meyer.

Com o valor do parâmetro do material (A) e a equação abaixo, pode-se calcular o limite de escoamento (σ_e) do material ensaiado.

$$\sigma_e = \beta_m \cdot A \quad (5)$$

onde β_m é uma constante obtida pela classe do material. Um valor aceito de β_m para todos os aços carbono é de 0,2285 (HAGGAG, 1993; MURTY; HAGGAG, 1997).

2.4.2.2 Limite de Resistência

Baseado na premissa da semelhança dos resultados do ensaio de tração e compressão com a tensão verdadeira (σ_v) temos:

$$\sigma_v = K \cdot \varepsilon_v^n \quad (6)$$

onde K é o coeficiente de resistência, ε_v é a deformação plástica verdadeira e n é o coeficiente de encruamento.

O limite de resistência (σ_r) é calculado usando-se os valores dos coeficientes de resistência (K) e de encruamento (n), que, por sua vez, são determinados através de uma regressão. A equação do limite de resistência (σ_r) é mostrada abaixo:

$$\sigma_r = K \cdot \left(\frac{n}{e} \right)^n \quad (7)$$

onde e é o número de Euler, com valor constante de 2,7182.

Para determinar os valores de tensão verdadeira (σ_v) e da deformação plástica verdadeira (ε_v), são utilizadas as seguintes equações:

$$\sigma_v = \frac{4.F}{\pi \cdot d_p^2 \cdot \delta} \quad (8)$$

$$\varepsilon_v = 0,2 \cdot \frac{d_p}{D} \quad (9)$$

onde F é a carga utilizada no ensaio, d_p é o diâmetro plástico da indentação, mostrado na Figura 6, e δ é um fator relacionado com a restrição da deformação plástica. Esse fator é dependente das características do equipamento e da tensão de indentação.

O diâmetro plástico da indentação (d_p) pode ser determinado pela seguinte equação iterativa:

$$d_p = \sqrt[3]{2,735 \cdot F \cdot D \cdot \left(\frac{1}{E_a} + \frac{1}{E_i} \right) \cdot \left(\frac{4 \cdot h_p^2 + d_p^2}{4 \cdot h_p^2 + d_p^2 - 4 \cdot h_p \cdot D} \right)} \quad (10)$$

onde E_a é o módulo de elasticidade do material ensaiado e E_i é o módulo de elasticidade do material do penetrador.

O valor de δ é obtido pela seguinte equação:

$$\delta = \begin{cases} 1,12 & \text{se, } \phi \leq 1 \\ 1,12 + \tau \cdot \ln \phi & \text{se, } 1 < \phi \leq 27 \\ 2,87 \cdot \alpha_m & \text{se, } \phi > 27 \end{cases} \quad (11)$$

onde o valor de ϕ é determinado pela equação seguinte:

$$\phi = \frac{\varepsilon_v \cdot E_a}{0,43 \cdot \sigma_v} \quad (12)$$

onde o valor de τ é determinado pela seguinte equação:

$$\tau = \frac{(2,87 \cdot \alpha_m - 1,12)}{\ln(27)} \quad (13)$$

Onde α_m é um fator dependente da sensibilidade à taxa de deformação e endurecimento triaxial do material e varia de 0,90 a 1,25 para vários aços estruturais (MURTY *et al.*, 1998).

2.4.2.3 Energia Absorvida

A técnica de indentação pode ser usada para estimar a energia absorvida pelo material (energia de *Charpy*) e tenacidade à fratura do material. Este uso particular da indentação não é algo natural, visto que a indentação não induz nenhuma fissura no material. Além disso, as tensões no centro da superfície de contato do material ensaiado são de compressão, enquanto as tensões na ponta de uma trinca da amostra são de tração (MURTY *et al.*, 1998).

É suposto que embora o carregamento de compressão não promova a fratura, ele introduz uma triaxialidade de tensões no material através da indentação (TIMOSHENKO; GOODIER, 1970). A teoria da elasticidade e as análises computacionais mostram que a tensão triaxial presente na ponta de uma trinca e no centro do contato superficial do penetrador na indentação são similares (BYUN; KIM; HONG, 1997)

A energia de deformação no centro da indentação é semelhante ao da ponta da trinca. Portanto, a energia de indentação por unidade de área de contato até uma tensão crítica de fratura está relacionada com a energia de fratura de um material (HAGGAG *et al.*, 1998). A

energia de fratura estimada no ensaio de indentação é denominada energia de indentação para fratura (IEF – *Indentation Energy to Fracture*) (MURTY *et al.*, 1998).

O modelo IEF assume que a condição de fratura ocorre quando a tensão produzida pela esfera de indentação ultrapassa a tensão crítica de fratura por clivagem (σ_f) do material (MURTY *et al.*, 1998). Portanto, se o valor da tensão no ponto de contato é conhecido em função da profundidade da indentação, então a profundidade em que a tensão ultrapassa o valor da tensão de fratura pode ser calculada. Determinando a energia depositada no material pelo indentador em função da profundidade até a tensão de fratura, tem-se a energia de indentação para fratura (IEF) (HAGGAG *et al.*, 1998).

Segundo Murty *et al.* (1998), para determinação da energia de indentação para fratura são necessários:

- 1 – Relação entre a tensão de indentação e a profundidade de indentação;
- 2 – Relação entre a tensão de indentação e a tensão normal no ponto de contato;
- 3 – O valor da tensão crítica de fratura por clivagem;
- 4 – Relação entre a energia depositada no material pelo indentador e a profundidade de penetração.

A relação entre a tensão de indentação e a profundidade de indentação é facilmente obtida através da conversão dos dados da curva de carga x profundidade para tensão x deformação (MURTY *et al.*, 1998). Assim, com o valor de tensão de referência, obtém-se a profundidade de fratura (h_f), como mostrado na Figura 8.

Com a teoria da elasticidade, a relação entre a tensão de indentação (σ_i) e a tensão normal de compressão no ponto de contato é estimada como aproximadamente 2/3. Ao invés de converter a tensão de indentação à tensão normal no ponto de contato, é convertida a tensão crítica de fratura por clivagem (σ_f) à tensão de fratura representativa (σ_f^r), que é a tensão crítica de fratura para a tensão de indentação e utilizada para determinar a profundidade de fratura (HAGGAG *et al.*, 1998), como mostrado na Figura 8 e é determinada conforme a equação abaixo:

$$\sigma_f^r = \frac{2}{3} \cdot \sigma_f \quad (14)$$

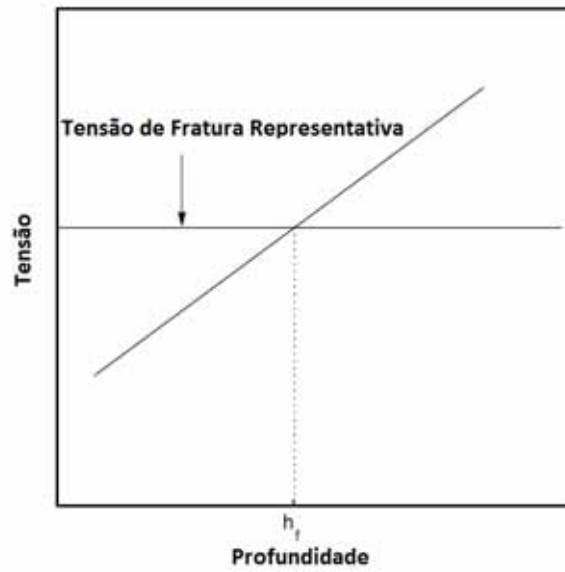


Figura 8– Ilustração da Determinação da Profundidade de Fratura (adaptado de MURTY *et al.*, 1998)

A energia de indentação para fratura (E_{IEF}) é então definida pela seguinte equação:

$$E_{IEF} = \int_0^{h_f} \sigma_i(h).dh \quad (15)$$

onde σ_i é a tensão de indentação em função da penetração (h), que pode ser definida pela equação seguinte:

$$\sigma_i = \frac{F}{\left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \right)} \quad (16)$$

onde F é a carga aplicada na indentação e d é o diâmetro da indentação.

O valor da carga (F) pode ser definido pela seguinte equação:

$$F = m_{CP} \cdot h \quad (17)$$

onde m_{CP} é o coeficiente angular da curva de carregamento *versus* penetração.

O valor do diâmetro da indentação é determinado da mesma forma que o diâmetro total da indentação (d_t) mostrado na Equação (3). Dessa forma temos:

$$d = 2 \cdot \sqrt{D \cdot h - h^2} \quad (18)$$

Assim a Equação (15) pode ser definida como:

$$E_{IEF} = \int_0^{h_f} \frac{m_{CP} \cdot h}{\pi \cdot (Dh - h^2)} \cdot dh = \frac{m_{CP}}{\pi} \cdot \ln \left[\frac{D}{(D - h_f)} \right] \quad (19)$$

Com o valor da energia de indentação para fratura podemos comparar com a energia absorvida no teste de impacto (energia de *Charpy*).

2.4.2.4 Dureza

O cálculo para determinar a dureza Brinell (HB) através do ensaio de indentação instrumentada com penetrador esférico é baseado no ensaio de dureza Brinell padronizado pela ASTM E 10-84, e é realizada pela seguinte equação (SOUSA; SOARES; FRANCO, 2008):

$$HB = \left\{ \frac{2 \cdot F_{m\acute{a}x}}{\pi \cdot D \cdot \left[D - \left(D^2 - d_f^2 \right)^{0,5} \right]} \right\} \quad (20)$$

onde $F_{m\acute{a}x}$ é a carga máxima no ensaio em kgf, D é o diâmetro da esfera do penetrador em mm e d_f é o diâmetro final da impressão em mm.

2.4.3 Instrumentação e Controle

Para determinar as propriedades mecânicas através da indentação existem muitas equações envolvidas, inclusive equações iterativas, que tornam os cálculos extensos. Além disso, a precisão das grandezas obtidas no ensaio é de fundamental importância, necessitando de dispositivos de controle e de monitoramento, em tempo real, das grandezas envolvidas no ensaio. Verificando essas necessidades, Ramos Neto e Franco (2002), além de desenvolver um equipamento portátil que permite a realização de ensaios de macroindentação *in-situ*, acoplando o equipamento na estrutura do componente, desenvolveram interfaces entre diversos elementos de instrumentação com um sistema de gerenciamento (microcomputador), e procedimentos computacionais para monitoramento e controle do ensaio (RAMOS NETO *et al.*, 2003). (ver Figura 17)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Material Estudado

Na parada de manutenção de novembro de 2006 foram retiradas amostras do suporte do chapéu chinês do conjunto conversor, material similar ao aço liga com 2,25%Cr-1,0%Mo, estudado nesse trabalho, que foram sujeitos às mesmas condições internas de produto e temperatura (550 °C) do componente estudado por cerca de 25 anos de operação (GUIMARÃES; NASCIMENTO, 2006). O local de onde as amostras foram retiradas é ilustrado na Figura 9.

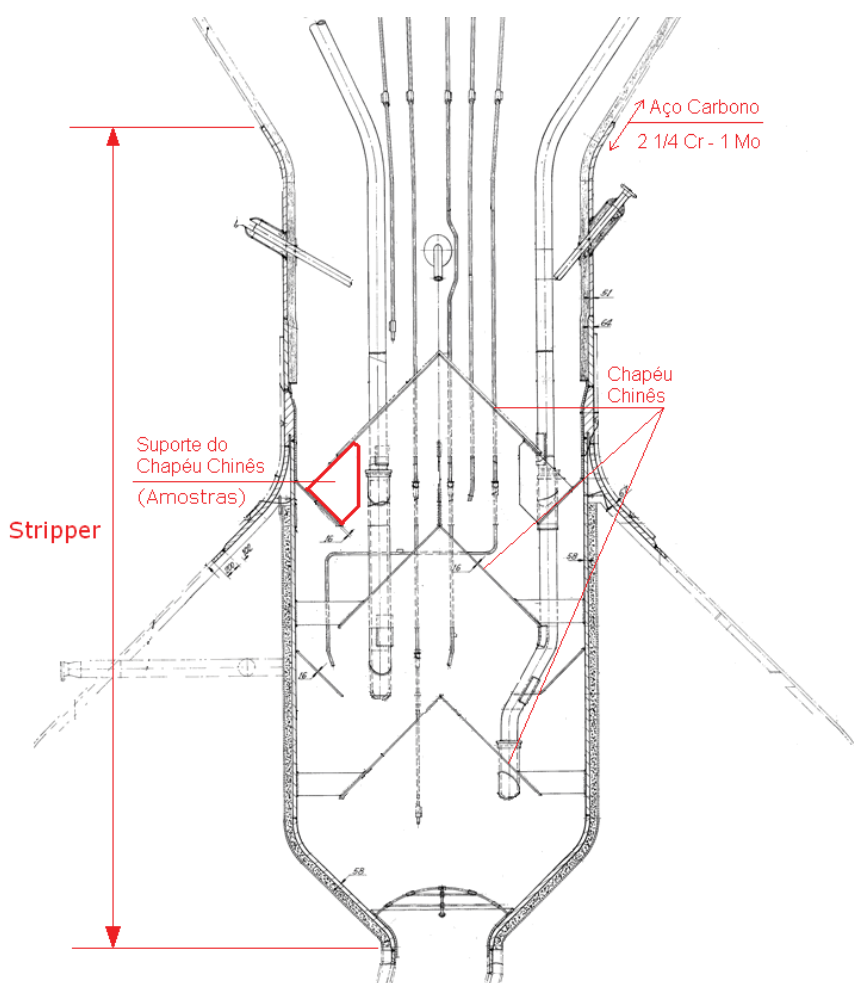


Figura 9 – Local da Retirada das Amostras do Suporte do Chapéu Chinês (GUIMARÃES; NASCIMENTO, 2006)

A amostra 1 com tamanho aproximado de 300 x 150 mm e espessura de 12 mm; a amostra 2 com tamanho aproximado de 150 x 150 mm e espessura de 12 mm; e a amostra 3 com tamanho aproximado de 150 x 150 mm e espessura de 12 mm, são mostrados na Figura 10. A amostra 4 com tamanho aproximado de 185 x 125 mm e espessura de 12 mm é mostrada na Figura 11.

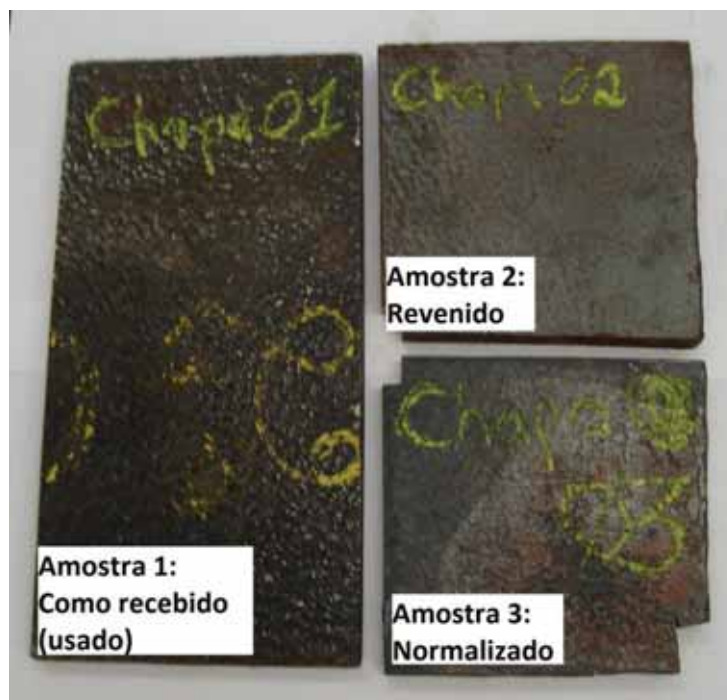


Figura 10 – Amostras 1, 2 e 3 do Suporte do Chapéu Chinês (ADACHI, 2011)



Figura 11 – Amostra 4 do Suporte do Chapéu Chinês (ADACHI, 2011)

A espessura original da chapa do suporte do chapéu chinês é de 17 mm. Essa diferença entre as espessuras do material novo (17 mm) com as amostras retiradas (12 mm) para realização dos ensaios deve-se ao desgaste do material por cerca de 25 anos de operação do componente.

3.2 Análise Química

A análise química por espectrometria de emissão ótica foi realizada pelo laboratório da Proaqt, prestadora de serviços para a Petrobras, através de um contrato indireto com a empresa Araújo Engenharia.

A amostra utilizada para realização da análise foi retirada da amostra do suporte do chapéu chinês.

3.3 Tratamento Térmico

Três das quatro amostras do suporte do chapéu chinês foram submetidas aos tratamentos térmicos de revenido, de normalização e de normalização seguida de revenido, sendo identificadas como amostras 2, 3 e 4, respectivamente, conforme mostradas na Figura 10 e na Figura 11. Os tratamentos foram feitos para avaliar as mudanças das propriedades mecânicas com a alteração metalúrgica do material.

Os parâmetros de temperaturas para realizar os tratamentos térmicos foram baseados nas recomendações feitas no trabalho interno realizado pela Refinaria de Cubatão – RPBC (SILVA *et al.*, 1988).

A amostra 1 não foi submetida a nenhum tratamento térmico, com o intuito de avaliar as características mecânicas do material na condição de 25 anos de operação.

O tratamento térmico de revenido (amostra 2) foi realizado com uma temperatura de 675 °C com duração de 1 hora e com resfriamento ao ar sobre um tijolo refratário.

O tratamento térmico de normalização (amostra 3) foi realizado com uma temperatura de 980 °C com duração de 1 hora e também resfriado ao ar sobre um tijolo refratário.

Na amostra 4 foi realizado o tratamento térmico de normalização conforme realizado na amostra 3. Após o resfriamento, a amostra foi sujeita ao tratamento térmico de revenido nas mesmas condições da amostra 2.

3.4 Caracterização Mecânica

Para a caracterização mecânica das amostras foram realizados os ensaios não destrutivos de dureza e indentação instrumentada, ensaios destrutivos de impacto, de tração à temperatura ambiente e tração a quente com temperatura de 550 °C.

3.4.1 Ensaio de Dureza

Os próprios corpos-de-prova utilizados nos ensaios de impacto *Charpy*, e devolvidos pela empresa Proaqt após os ensaios, foram aproveitados para realização dos ensaios de dureza.

O equipamento utilizado para realização dos ensaios foi uma máquina de dureza Heckert, de propriedade do setor de Inspeção de Equipamentos da REVAP, apresentada na Figura 12.

Para definir a melhor escala de medição foi utilizado um procedimento próprio da máquina elaborado pelo setor de Inspeção de Equipamentos da REVAP. O procedimento consiste em medir a dureza do corpo-de-prova primeiramente com o método Rockwell A (HR_A). Se caso o resultado for menor que 60 HR_A , utiliza-se o método Rockwell B (HR_B), e se o resultado for maior que 60 HR_A , utiliza-se o método Rockwell C (HR_C) para medição.



Figura 12 – Máquina de Dureza Heckert da REVAP – Petrobras (ADACHI, 2011)

Conforme os critérios do procedimento, para os corpos-de-prova das amostras 1 e 2 foram utilizadas a medição na escala HR_B e para os corpos-de-prova das amostras 3 e 4 foram utilizadas a medição na escala HR_C .

A medição de dureza na escala Rockwell A (HR_A) consiste na utilização de um penetrador cônico de diamante com aplicação de uma carga de 60 kg. A medição na escala Rockwell B (HR_B) consiste na utilização de um penetrador de aço esférico, de elevada dureza, com 1/16 polegadas de diâmetro com aplicação de uma carga de 100 kg. Para a medição na escala Rockwell C (HR_C) utilizou-se um penetrador cônico de diamante com aplicação de uma carga de 150 kg.

Todas as medidas foram convertidas para a escala Brinell (HB), fazendo uso da norma ASTM E140 (2007), para possibilitar a comparação dos resultados.

3.4.2 Ensaio de Impacto

O ensaio de impacto, realizado pela empresa Proaqt, foi o ensaio de *Charpy* a temperatura ambiente (23 °C) conforme procedimento da norma ASTM A370 (2009). A máquina de impacto utilizada pela empresa foi a WPM VEB MQI 001 e os corpos-de-prova padrão utilizados estão ilustrados na Figura 13.

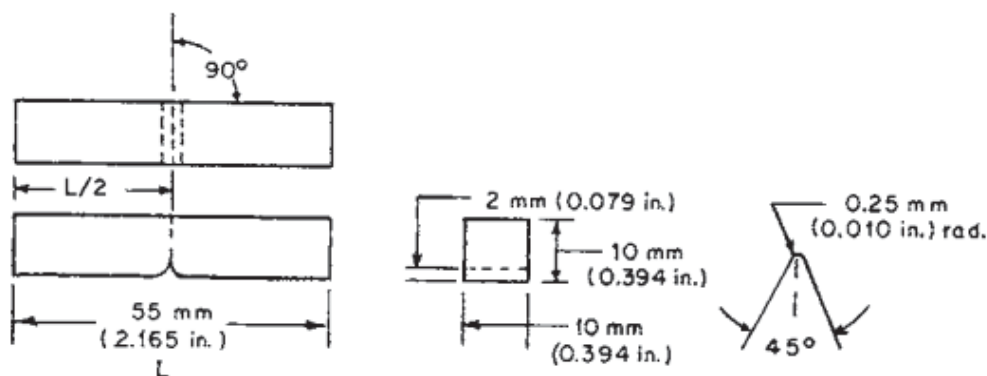


Figura 13– Corpo-de-prova para Ensaio de Impacto Charpy (viga simples) (ASTM A370, 2009)

Os corpos-de-prova para o ensaio foram removidos no sentido transversal das amostras, conforme mostrados na Figura 14 e na Figura 15, adaptadas da Figura 10 e da Figura 11, respectivamente, para ilustrar o sentido de remoção dos corpos-de-prova.

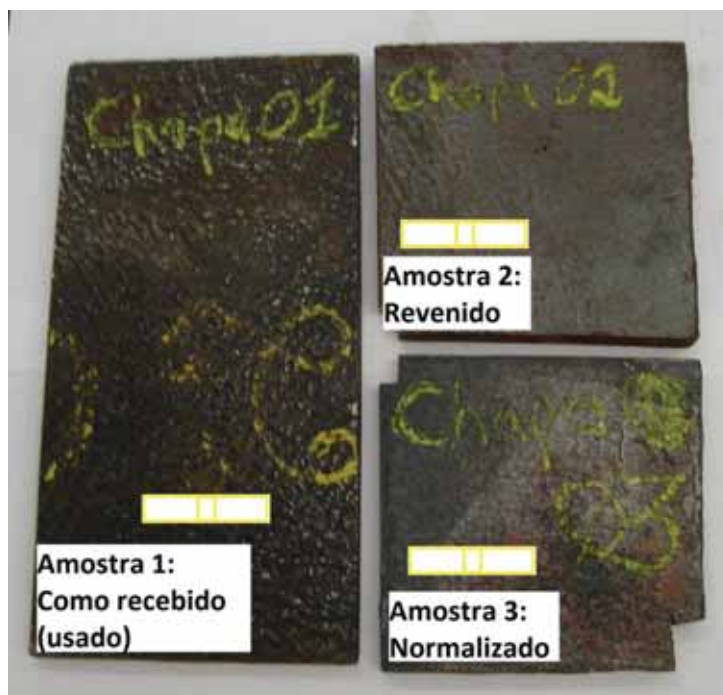


Figura 14 – Sentido de Remoção dos Corpos-de-prova das Amostras 1, 2 e 3 (adaptada da Figura 10) (ADACHI, 2011)



Figura 15 – Sentido de Remoção dos Corpos-de-prova da Amostra 4 (adaptada da Figura 11) (ADACHI, 2011)

3.4.3 Ensaio de Tração a Temperatura Ambiente

Os ensaios de tração foram feitos em temperatura ambiente e realizados em corpos-de-prova removidos no mesmo sentido dos corpos-de-prova do ensaio de impacto.

Os ensaios foram também realizados na empresa Proaqt, utilizando uma máquina universal de ensaio modelo MTR 006 com o procedimento da norma ASTM A370 (2009).

Os corpos-de-prova foram usinados conforme mostrado na Figura 16.

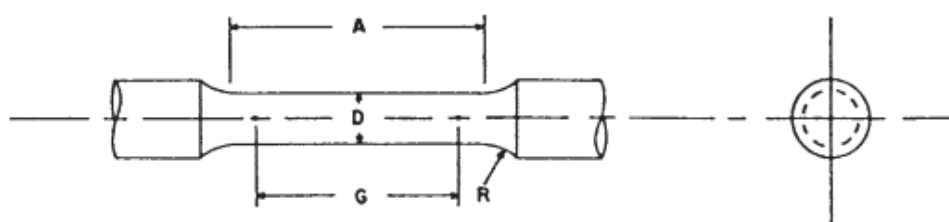


Figura 16 – Geometria do Corpo-de-prova para Ensaio de Tração (ASTM A370, 2009)

As dimensões adotadas conforme a norma ASTM A370 (2009) são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 – Dimensões do corpo-de-prova padrão para ensaio de tração (ASTM A370, 2009)

Símbolo	Dimensões	Valores [mm]
D	Diâmetro	$8,75 \pm 0,18$
G	Comprimento útil	$35,0 \pm 0,10$
R	Raio de curvatura (mínimo)	6
A	Comprimento da seção reduzida	45

3.4.4 Ensaio de Tração a Quente

Os ensaios de tração a quente foram baseados na temperatura de operação do material. A temperatura adotada foi de 550 °C.

Estes ensaios tiveram como objetivo estimar as propriedades mecânicas do material que não foi substituído e ainda está submetido às condições de operação de 550 °C e 35 MPa (3,58 kgf/cm²).

Os parâmetros utilizados para preparação dos corpos-de-prova para o ensaio de tração a quente foram os mesmos utilizados para a realização do ensaio de tração a temperatura ambiente, descritos no subitem anterior.

3.4.5 Ensaio de Indentação Instrumentada

Os ensaios de indentação instrumentada foram realizados no corpo de prova utilizado para ensaio de impacto de *Charpy* da amostra 1, aproveitando a preparação superficial do mesmo; e no material do costado do stripper *in-situ*, aproveitando a parada de manutenção da unidade de craqueamento catalítico da REVAP de maio de 2011.

O equipamento utilizado para o ensaio é mostrado na Figura 17.



Figura 17 – Equipamento Utilizado para Realizar o Ensaio de Indentação Instrumentada *in-situ* (RAMOS NETO; GUIMARÃES, 2011)

Para todos os ensaios as superfícies foram preparadas localmente com lixamento abrasivo até uma granulometria final de 150 mesh. O penetrador utilizado no equipamento de indentação instrumentada foi uma esfera de liga de tungstênio e cobalto (WCCo) de 0,76 mm de diâmetro.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise Química

O resultado da análise química do material do suporte do chapéu chinês realizada por espectrometria de emissão óptica é apresentado na Tabela 4. O desvio padrão é de ± 1 % dos resultados obtidos.

Tabela 4 – Composição Química do Material do Costado do Stripper

Elemento	Símbolo	Composição, %
Silício	Si	0,27
Manganês	Mn	0,48
Fósforo	P	0,013
Estanho	Sn	0,001
Antimônio	Sb	0,001
Arsênio	As	0,003
Cobre	Cu	0,02

Observando os valores dos elementos exigidos na norma ASTM A 387 da

Tabela 1 e comparando-os com os resultados apresentados na Tabela 4, verifica-se que os mesmos estão dentro dos padrões permitidos.

Fazendo o uso dos valores da Tabela 4, é possível calcular o valor dos fatores J e X, através das equações (1) e (2), bem como a soma dos elementos fósforo (P) e estanho (Sn).

Os resultados dos cálculos dos fatores J e X, e a soma dos elementos fósforo (P) e estanho (Sn) para o material do suporte do chapéu chinês, bem como os limites estabelecidos pelo API RP 571 (2003) são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores dos Fatores J e X da Amostra do Suporte do Chapéu Chinês

Fator	Resultado	Limite API
Fator J	105	< 100
Fator X	14,2	< 15
Soma (P+Sn)	0,014%	<0,010%

No caso do material do suporte do chapéu chinês, o fator J calculado está acima do limite da norma API RP 571 (2003), com o valor de 105, bem como a soma dos elementos fósforo (P) e estanho (Sn), com 0,014 %. Porém para o fator X, critério para verificar a susceptibilidade do metal de solda, o mesmo não apresenta susceptibilidade ao mecanismo de dano, apresentando um valor calculado menor que o limite estabelecido pela norma. Porém, o valor calculado de 14,2 está bem próximo do limite estipulado pela norma.

Como os valores calculados para verificação da susceptibilidade estão bem próximos dos valores limites, tanto para cima quanto para baixo, é de fundamental importância realizar a caracterização mecânica das amostras retiradas do suporte do chapéu chinês, a fim de verificar se o mecanismo de dano de fragilização ao revenido está em atividade no material, ou seja, se o material está apresentando perdas das propriedades mecânicas.

4.2 Caracterização Mecânica

4.2.1 Ensaio de Dureza

Os resultados preliminares do ensaio de dureza para seleção do método a ser utilizado, conforme descrito no item 3.4.1, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados dos Ensaios de Dureza Preliminar das Amostras do Suporte do Chapéu Chinês

Medida	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
[HR_A]	46	49	63	62

A Figura 18 mostra os resultados preliminares da medição de dureza e a seleção dos métodos adotados para medição. A linha na horizontal mostra o critério da escolha de escala de medição de dureza (60 HR_A) conforme procedimento específico da máquina.

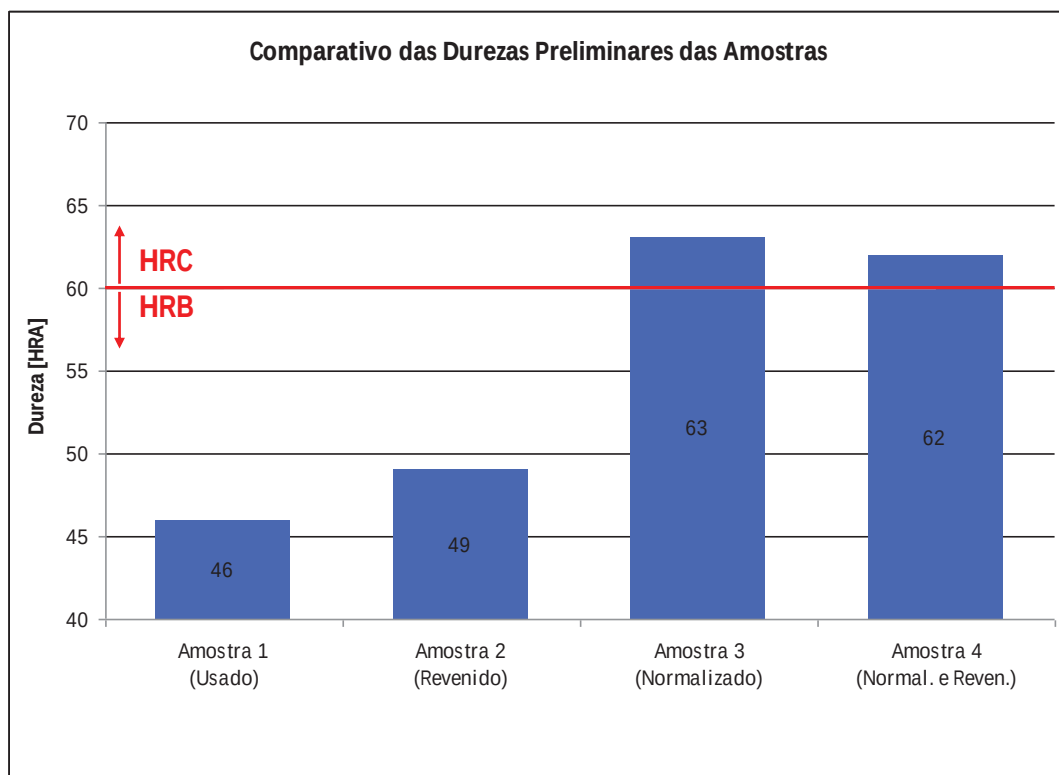


Figura 18 – Comparativo das Durezas Preliminares das Amostras do Suporte do Chapéu Chinês (ADACHI, 2011)

Os resultados dos ensaios de dureza realizados nas amostras do suporte do chapéu chinês, nas escalas em HR_B para as amostras 1 e 2 e HR_C para as amostras 3 e 4, são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados dos Ensaio de Dureza das Amostras do Suporte do Chapéu Chinês

Medida	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
	[HR_B]	[HR_B]	[HR_C]	[HR_C]
1	80	83	24	19
2	82	82	23	20
3	78	83	17	18,5
4	81	82	19	18,5
5	81	81	22	16,5

Os resultados das medidas de dureza, da Tabela 7, convertidas em HB (escala de dureza Brinell) utilizando a norma ASTM E140 (2007) são apresentando na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados dos Ensaios de Dureza das Amostras do Suporte do Chapéu Chinês Convertida para Dureza Brinell (HB)

Medida	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
1	150	159	247	221*
2	156	156	243	226
3	144	159	210*	218*
4	153	156	221*	218*
5	153	153	237	207*
Média	151	157	232	218
Desvio Padrão	4,5	2,5	15,6	7

Os valores marcados com o símbolo “ * ” na Tabela 8 não estão disponíveis na tabela de conversão da norma ASTM E140 (2007). Para estes valores foi utilizado o método da regressão linear com os sete valores do limite inferior da tabela disponível na norma. O resultado da regressão linear é apresentado na Figura 19.

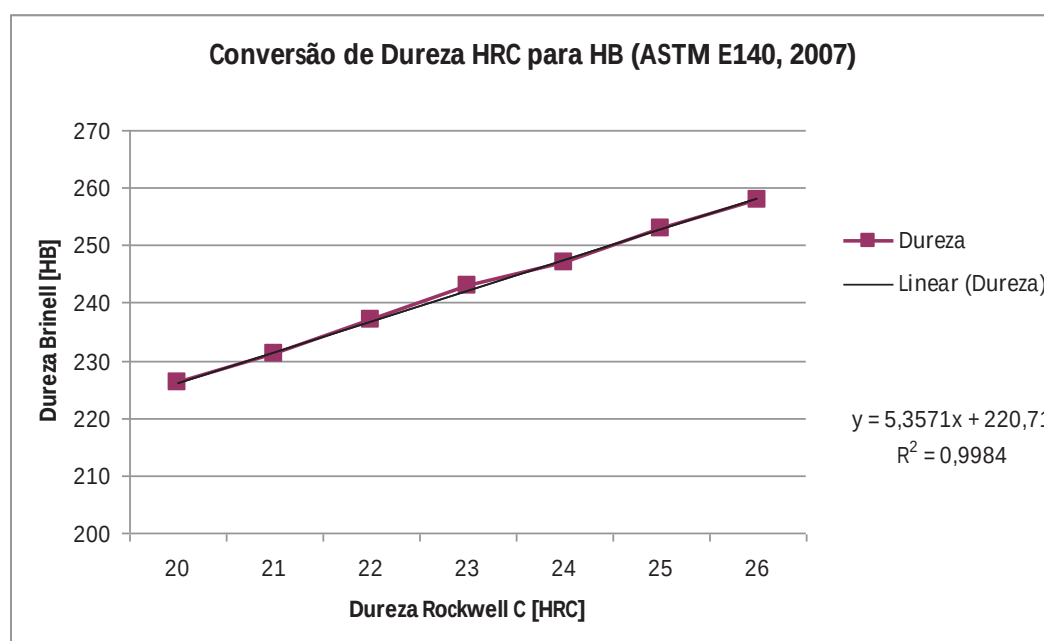


Figura 19 – Regressão Linear para Conversão de Dureza Rocwell C (HRC) para Brinell (HB) (ADACHI, 2011)

A Figura 20 mostra o comparativo entre as médias das medidas de dureza realizadas nas amostras do suporte do chapéu chinês, também mostra o valor máximo exigido pela norma ASME divisão II (2010) para o aço ASTM A 387 Gr. 22.

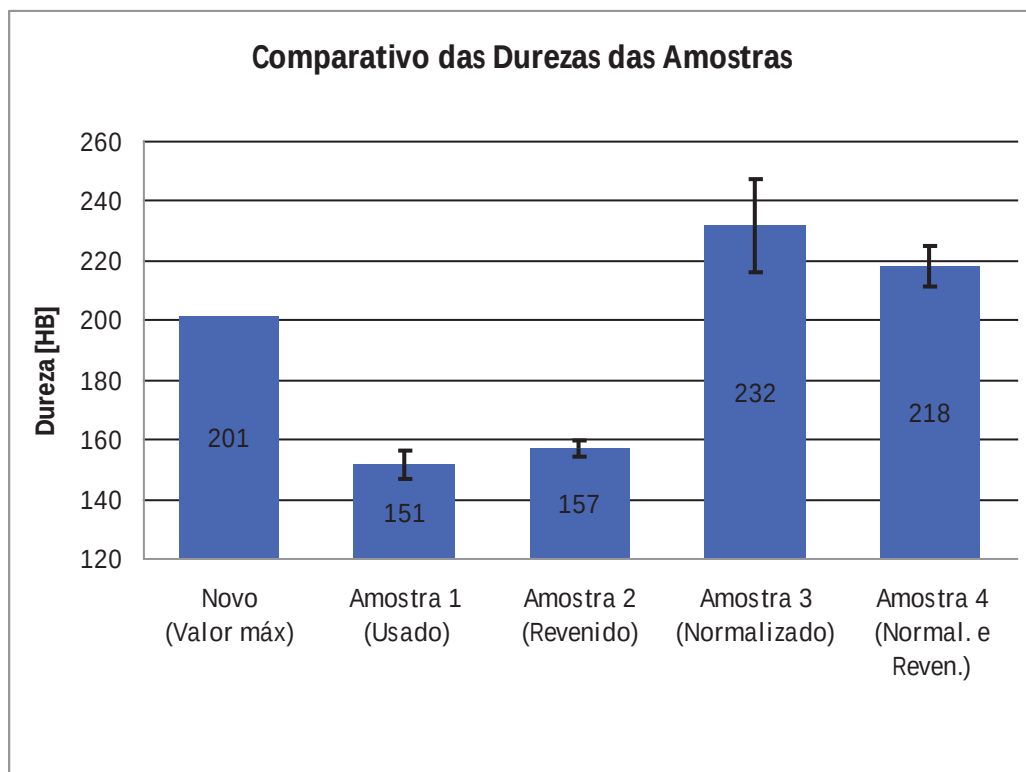


Figura 20 – Comparativo de Dureza das Amostras do Suporte do Chapéu Chinês (ADACHI, 2011)

Com os resultados de dureza obtidos, é possível verificar que o tratamento térmico de revenido realizado na amostra 2, não apresenta diferença significativa na dureza comparado com a dureza do material usado (amostra 1).

Pode-se observar também que o tratamento térmico de normalização, realizado nas amostras 3 e 4, aumenta significativamente a dureza do material.

O resultado mostra que o material usado (amostra 1) e a amostra revenida (amostra 2) apresentam valores médios de dureza abaixo do valor máximo de dureza exigido pela norma ASME divisão II (2010); enquanto que as amostras 3 e 4, tratadas termicamente, apresentaram durezas acima do valor máximo exigido pela norma.

Normalmente quando o material apresenta valores de dureza elevada, significa que o mesmo apresenta baixa tenacidade, sendo mais susceptível a fratura frágil. Porém, em muitos casos, a dureza e as propriedades de resistência à tração do material não apresentam

modificações como resultado da fragilização ao revenido (ZUMPARO, 2003). Devido a isso os outros ensaios previstos são necessários.

4.2.2 Ensaio de Impacto

Os resultados dos ensaios de impacto *Charpy* a temperatura ambiente nas amostras do suporte do chapéu chinês são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados dos Ensaios de Impacto Charpy das Amostras do Suporte do Chapéu Chinês a Temperatura Ambiente [Joule]

Corpo-de-prova	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
1	139	178	16	27
2	154	150	12	30
3	169	144	20	41
4	127	175	19	-
5	129	185	24	-
Média	144	166	18	33
Desvio Padrão	18	18	4	7

A Figura 21 apresenta o comparativo entre os resultados das energias absorvidas pelas amostras no ensaio de impacto *Charpy* a temperatura ambiente.

Com os resultados apresentados na Figura 21, pode-se verificar que o material usado (amostra 1) e a amostra revenida (amostra 2), apresentam valores de energia de absorção satisfatória, acima do valor mínimo exigido pela especificação técnica do CENPES (EKSTEIN, 2006) de 54 J, para aços liga 2,25Cr-1Mo. Isso demonstra que o material usado (amostra 1) não está com o mecanismo de dano de fragilização ao revenido em atividade. Porém, as amostras 3 e 4 apresentam energia de absorção abaixo do valor mínimo exigido pela especificação técnica do CENPES.

Com o tratamento térmico de revenido (amostra 2), a partir do material usado (amostra 1) os resultados pouco diferem.

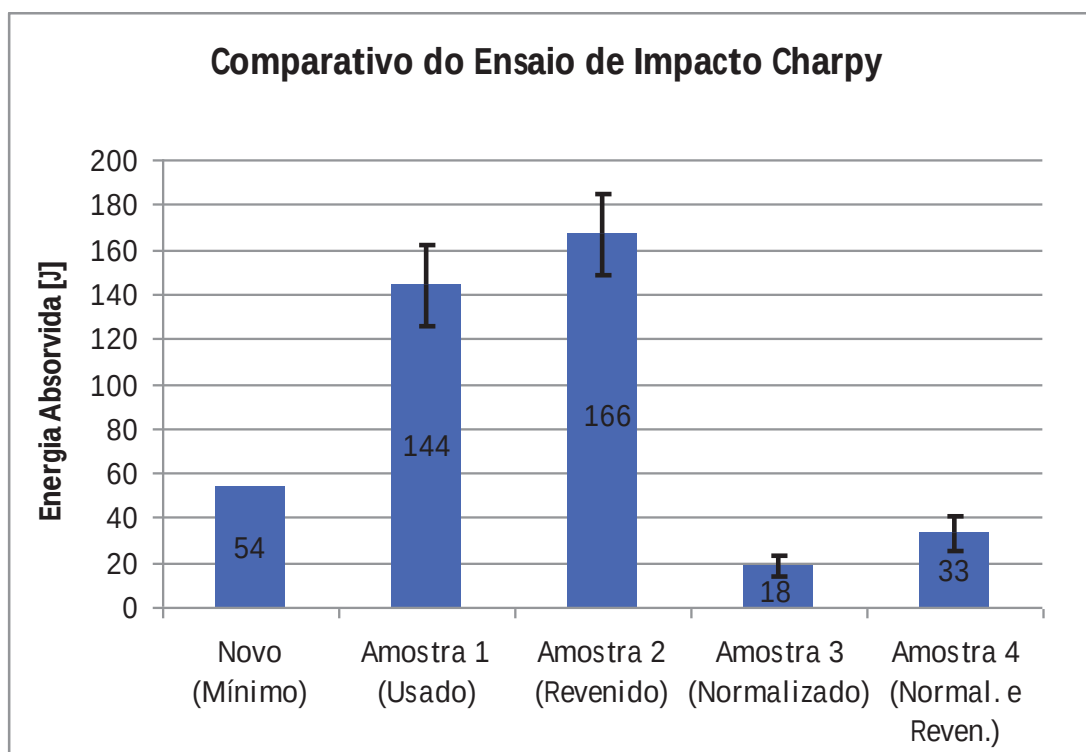


Figura 21 – Comparativo da Energia Absorvida das Amostras do Suporte do Chapéu Chinês (ADACHI, 2011)

Observa-se também (Figura 21) observa-se que o tratamento térmico de normalização, nas amostras 3 e 4, não obtiveram resultados positivos em relação ao incremento de energia absorvida. E o tratamento térmico de revenido após a normalização, na amostra 4, apresentou um aumento de aproximadamente 80 % na energia de absorção do material em relação à amostra apenas normalizada (amostra 3).

4.2.3 Ensaio de Tração a Temperatura Ambiente

Os resultados dos ensaios de tração a temperatura ambiente são mostrados na Tabela 10:

Tabela 10 – Resultados dos Ensaios de Tração a Temperatura Ambiente

Propriedades	Unidade	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
Limite de Resistência	MPa	498	511	884	802
Limite de Escoamento	MPa	366	380	618	659
Alongamento	%	27	27	21	22
Redução de Área	%	78	77	71	74

Comparando os valores, da Tabela 10, de limite de resistência e de escoamento obtidos pelo ensaio de tração a temperatura ambiente da amostra 1, material usado, com os requisitos da norma na Tabela 2, verifica-se que, quando comparado com o material classe 1, não houve perda das propriedades após cerca de 25 anos de operação em elevadas temperaturas (550 °C). Quando comparado com o material classe 2 da Tabela 2, verificamos que para o limite de escoamento o material ainda está dentro da especificação da norma, enquanto que para o limite de resistência, o material está um pouco abaixo da especificada pela norma. Porém, como o projeto do equipamento, através do código ASME seção VIII divisão 2, considera somente o limite de escoamento do material, pode-se dizer que o material usado, amostra1, ainda atende aos requisitos de projeto.

Analisando a Tabela 10 e comparando os valores requeridos pela norma (Tabela 2) com os valores obtidos para as outras amostras, verificamos que a amostra 2 também possui valores dentro da especificação da classe 1 da norma, e para a classe 2, atende ao limite de escoamento e fica pouco abaixo do limite de resistência. Porém, as amostras 3 e 4 possuem os valores de limite de resistência e limite de escoamento acima dos especificados pela norma.

Comparando os limites de resistência, observa-se que o valor da resistência mecânica do material usado aumentou cerca de 3 % após o tratamento térmico de revenido. Contudo, após o tratamento térmico de normalização e após o tratamento térmico de normalização e revenido o aumento foi significativo (70 %).

Para o limite de escoamento, os resultados foram semelhantes, ou seja, pequeno aumento para o material revenido (amostra 2) e substancial aumento nas amostras normalizadas (amostras 3 e 4).

O alongamento percentual e a redução de área medem a deformação plástica ocorrida durante o ensaio de tração. Quanto maior o alongamento ou a redução de área, maior é a deformação plástica e, conseqüentemente, maior a ductilidade do material (Guimarães, 2011).

Verificando os valores de alongamento percentual e da redução de área das amostras na Tabela 10, observa-se que não há diferenças significativas entre o material da amostra da condição de usado com as amostras tratadas termicamente. Sendo que os valores máximos encontrados, para ambas as propriedades, são da amostra 1, na condição de usado. Conclui-se que o material na condição de usado possui maior ductilidade em comparação com as outras amostras. Mais uma vez fica nítido que o mecanismo de dano de fragilização ao revenido não ocorreu.

4.2.4 Ensaio de Tração a Quente

O ensaio de tração a quente foi realizado a uma temperatura de 550 °C nas amostras do suporte do chapéu chinês. A temperatura de 550°C foi utilizada para simular a condição de operação do equipamento.

Os resultados dos ensaios de tração a quente são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados dos Ensaios de Tração a Quente (550 °C)

Propriedades	Unidade	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
Limite de Resistência	MPa	776	301	325	708
Limite de Escoamento	MPa	643	281	293	612
Alongamento	%	21	26	27	18
Redução de Área	%	73	83	84	72

Comparando os limites de resistência das amostras na Tabela 11, pode-se observar que o material usado (amostra 1) que operou por cerca de 25 anos na condição de 550 °C, apresenta maior resistência do que as outras amostras. E o limite de resistência das amostras com o tratamento térmico de revenido e normalização sofreram uma queda significativa. O material que sofreu o tratamento térmico de normalização e depois o revenido (amostra 4) teve uma queda no limite de resistência comparado com a amostra 1.

Comparando os limites de escoamento, verifica-se o mesmo comportamento encontrado para o limite de resistência das amostras.

Para os valores de alongamentos percentual da Tabela 11, observa-se que os valores das amostras 2 e 3, que sofreram o tratamento térmico de revenido e normalização, respectivamente, aumentaram quando comparado com o material da amostra 1. A amostra 4, que sofreu o tratamento térmico de normalização seguido de revenido, sofreu também uma queda no seu alongamento percentual numa relação inversa do ocorrido com os valores dos limites de resistência e de escoamento.

Comparando-se os limites de escoamento dos ensaios de tração convencional (Tabela 10) com os ensaios de tração em elevada temperatura (Tabela 11) pôde-se observar uma queda do limite de escoamento nas amostras 2, 3 e 4. Contudo, para a amostra 1 esse fato não ocorre. Esse resultado inesperado deve ser melhor investigado em trabalhos futuros.

4.2.5 Ensaio de Indentação Instrumentada

Os resultados dos ensaios de indentação instrumentada na amostra 1 do suporte do chapéus chinês e no material do *stripper* são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados dos Ensaios de Indentação Instrumentada

Propriedades	Unidade	Amostra 1	Material do Stripper
Limite de Resistência	MPa	492	445
Limite de Escoamento	MPa	344	325
Dureza	HB	145	142
Energia Absorvida	J	142	160

Analizando os resultados da Tabela 12 e comparando com os resultados do ensaio de tração a temperatura ambiente, para o material da amostra 1, observamos uma diferença de 1,2 % para o limite de resistência e de 6,0 % para o limite de escoamento do material. Para ambos os resultados o valor foi menor do que o obtido pelo ensaio convencional destrutivo.

Ainda analisando a Tabela 12, e comparando com o resultado do ensaio de dureza para a amostra 1, verificamos uma diminuição de 4,0 % do ensaio convencional de dureza. Para a Energia Absorvida, verificamos uma pequena diminuição de 1,4 % em relação ao resultado do ensaio de impacto destrutivo *Charpy*.

Na Figura 22 é apresentado um comparativo entre os resultados dos ensaios convencionais, ensaio de tração, impacto e dureza, com os resultados obtidos através do ensaio de indentação instrumentada com os respectivos desvios padrão.

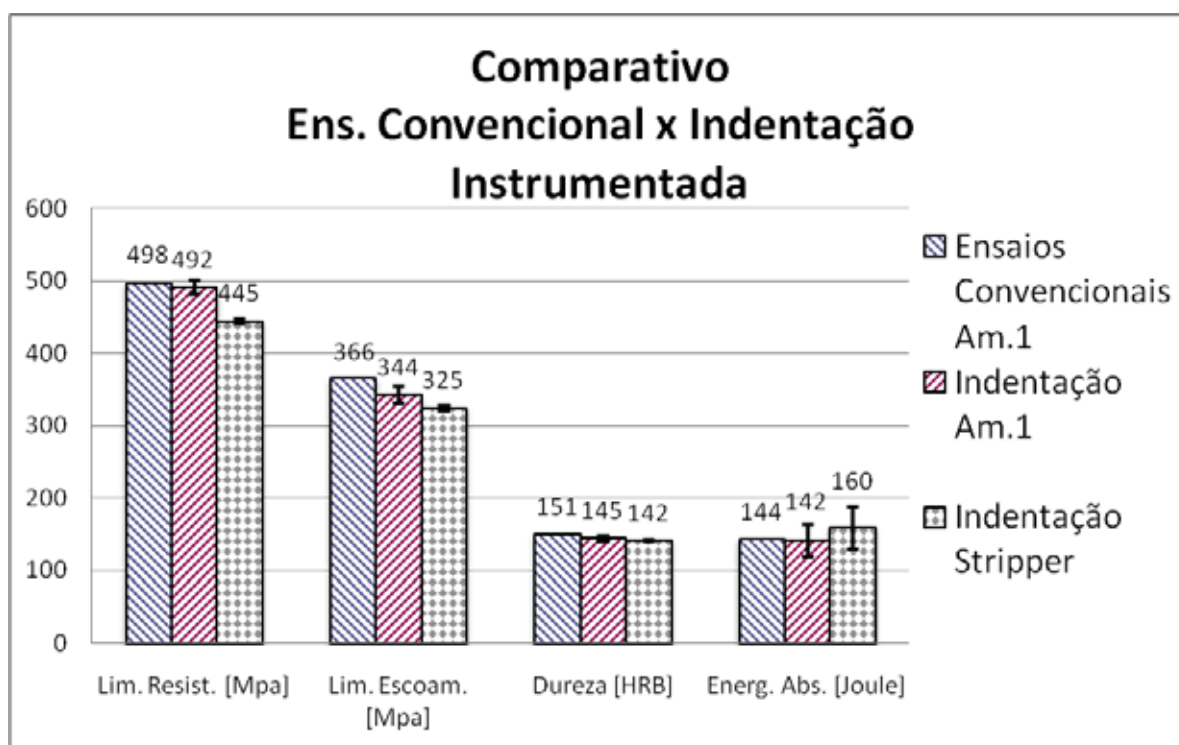


Figura 22 – Comparativo dos Resultados dos Ensaios Convencionais com os Resultados dos Ensaio de Indentação Instrumentada (ADACHI, 2011)

Observando a Figura 22, nota-se uma proximidade entre os valores dos resultados do ensaio de indentação instrumentada com os ensaios convencionais de tração, dureza e impacto, para a amostra 1. Assim, podemos afirmar que o ensaio de indentação instrumentada

obteve um bom resultado e poderá ser usado para análise *in-situ* do limite de resistência, limite de escoamento, dureza e energia absorvida. Isso avaliza os resultados obtidos pela indentação instrumentada na Tabela 12.

Considerando estes resultados, podemos afirmar que o mecanismo de dano de fragilização ao revenido não estava ativo para o material do *stripper*, assim como não está ativo no material do suporte do chapéu chinês.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo fornecer informações e dados quanto à fragilização ao revenido para verificar a necessidade de realizar a manutenção no *stripper* do conjunto conversor da unidade de craqueamento catalítico de leito fluidizado da REVAP. Estudou também a aplicabilidade do ensaio de indentação instrumentada para a detecção do fenômeno.

Com os ensaios realizados, foi verificado que o *stripper* não apresentou o fenômeno de fragilização ao revenido durante os anos de operação (cerca de 30 anos). Esse fato mostrou a empresa que até o presente momento não há necessidade de prever uma substituição ou recuperação do componente estudado, quanto ao risco à fratura frágil causada pela fragilização ao revenido.

Através da comparação dos resultados dos ensaios convencionais com os resultados do ensaio de indentação instrumentada, verificou-se que o mesmo pode ser aplicado para obtenção das propriedades desejadas para analisar a atividade do fenômeno de fragilização ao revenido, tais como: limite de escoamento, limite de resistência, dureza e energia absorvida do material.

Além disso, ficou demonstrado que o ensaio de indentação instrumentada pode ser aplicado para outros tipos de análise, caso as propriedades desejadas estejam entre as propriedades analisadas neste trabalho.

Foi possível garantir à REVAP que a fragilização ao revenido não está **ainda** em atividade no material do *stripper*, apesar dos 30 anos de operação. Contudo, na análise de susceptibilidade ao fenômeno, realizado nesse trabalho no suporte do chapéu chinês, que estava sujeito às mesmas condições de operação do *stripper*, o mesmo mostrou possível susceptibilidade à fragilização ao revenido. Sendo assim, recomenda-se que as análises sejam repetidas (ainda usando a indentação instrumentada) nas próximas paradas de manutenção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM - AMERICAN SOCIETY FOR METALS HANDBOOK. **Properties and selection: Irons, steels and high performance alloys.** 10th ed. Metals Park, Ohio, USA: American Society for Metals, 1990. v.1, 2521 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A 370:** Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. West Conshohocken, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A 387:** Specification for pressure vessel plates, alloy steel, chromium-molybdenum. West Conshohocken, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 140:** Standard hardness conversion tables for metals: relationship among brinell hardness, vickers hardness, rockwell hardness, superficial hardness, knoop hardness, and scleroscope hardness. West Conshohocken, 2007.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME II:** Part A: ferrous material specifications. New York, 2010.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE RECOMMENDED PRACTICE. **API RP 571:** Damage mechanisms affecting fixed equipment in the refining industry. Washington, 2003.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE RECOMMENDED PRACTICE. **API RP 579:** Fitness for service. Washington, 2000.

BHADESHIA, H. K. D. H., *et al.*, **Power plant steels: remanent life assessment and the approach to equilibrium.** 4th International Charles Parsons Turbine Conference, Advances in Turbine Materials, Design and Manufacturing, Institute of Materials, London, UK, 1997.

BRUSCATO, R. **Temper embrittlement and creep embrittlement of 2¼Cr-1Mo shielded metal-arc weld deposits.** Welding J., 1970.

BUSCEMI, C. D., *et al.*, **Temper embrittlement in 2¼Cr-1Mo steels after 75,000-hour isothermal aging.** Journal of engineering materials and technology, 1991. v. 113, p. 329-335.

BYUN, T. S., KIM, J. W., HONG, J. H. **A theoretical model for determination of fracture toughness of reactor pressure vessel steels in the transition region from automated ball indentation test.** Taejon, 1997.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma instrodução.** 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

ECKSTEIN, C. B. **Additional Requeriments for Cr-Mo low alloy steel.** Rio de Janeiro: CENPES - Petrobras, 2006.

ECKSTEIN, C. B. **Requisitos de Fabricação para equipamentos em Cr-Mo submetidos a serviço com hidrogênio e fragilização ao revenido.** 10º Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos, Salvador, 2009. 8 p.

GUIMARÃES, A. F. **Caracterizações microestrutural e mecânica do aço 1,25Cr-0,5Mo submetido por longo período a alta pressão e elevada temperatura.** 2011. 151 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2011.

GUIMARÃES, A. F., NASCIMENTO, M.C. **Relatório de inspeção nº 037/06 do R-22001 – conjunto conversor.** São José dos Campos: REVAP - Petrobras, 2006. Documento interno.

HAGGAG, F. M., NANSTAD, R. K., BRASKI, D. N. **Structural integrity evaluation based on an innovative field indentation macroprobe.** ASME v. 170, Book nº. H00485, 1989. p. 101-107.

HAGGAG, F. M., *et al.*, **The use of field indentation microprobe in measuring mechanical proprieties of welds.** 2nd International Conference on Trends in Welding Research, Gatlinburg, 1989. p. 843-849.

HAGGAG, F. M., **In-situ measurements of mechanical proprieties using novel automated ball indentation system.** Small Specimen Test Techniques Applied to Nuclear Reactor Thermal Annealing and Plant Life Extension, ASTM STP 1204, Philadelphia, 1993. p. 27-44.

HAGGAG, F. M., *et al.*, **Scripta met and mater.** 1998.

HERTZBERG, R. W. **Deformation and fracture mechanics of engineering materials.** USA: John Wiley & Sons, 4th ed., 1996. 680 p.

KESSELER, S. G. **Avaliação microestrutural do aço 2,25%Cr-1Mo submetido a ensaios em condições relevantes para a indústria petroquímica.** 2000. 139 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia) Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

MURTY, K. L., HAGGAG, F. M., **Processing of INTERPACK '97.** ASME, 1997.

MURTY, K. L., *et al.*, **Non-destructive evaluation of deformation and fracture proprieties of materials using stress-strain microprobe.** Pennsylvania, USA, 1998. 12 p.

PALFI, W., *et al.*, **Relatório sobre os riser's – parada geral UFCC – março/maio/88.** Cubatão: RPBC - Petrobras, 1988. Documento interno.

PEREIRA NETO, A. T. e ALVES, J. J. N. **Aperfeiçoamento da tecnologia do craqueamento catalítico do petróleo por técnicas da simulação numérica.** Campina Grande, s/ano.

RAMOS NETO, F. F., FRANCO, S. D. **Avaliação de propriedades mecânica em dutos através de ensaios de macroindentação instrumentada.** Anais do V Seminário de Pós-Graduação da Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2002.

RAMOS NETO, F. F., *et al.*, **Instrumentação e controle de um macroindentador portátil para avaliação de propriedades mecânicas de dutos.** 13º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2003.

RAMOS NETO, F. F., GUIMARÃES, A. F., **propriedades mecânicas in-situ do stripper do FCC da UO-REVAP.** Rio de Janeiro: CENPES - Petrobras, 2011. Documento interno.

SADEGHBEIGI, R. Process Description. In:____. **Fluid catalytic cracking handbook: design, operation and troubleshooting of FCC facilities.** Houston, TX, USA: Gulf Professional Publishing, 2000. p. 1-39.

SILVA, E. R. P., *et al.*, **Relatório sobre a fratura no riser norte da UFCC da RPBC.** Cubatão: RPBC - Petrobras, 1998. Documento interno.

SILVA TELLES, P. C. **Materiais para equipamentos de processo.** 6ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 273 p.

SOUSA, J. V., SOARES, A. B., FRANCO, S. D. **Desenvolvimento de um sistema de hardware e software para otimização das unidades de controle, monitoração, coleta e**

processamento de dados de um macroindentador portátil para avaliação in-situ de propriedades mecânicas de dutos metálicos. Uberlândia, 2008.

SOTELO, G. F. C. **Avaliação de fratura frágil em vasos de alto risco.** Seminário de Inspeção de Equipamentos, Rio de Janeiro, 2011. 10 p.

TABOR, D., **The hardness of metals.** Oxford University Press, New York, 1951.

TIMOSHENKO, S. P., GOODIER, J. N. **Theory of elasticity.** 3rd ed. McGraw-Hill, New York, 1970. p. 409-414.

WATANABE, J., *et al.*, **Design and material problems of direct desulfurization reactor.** Proceedings of the International Joint Petroleum Mechanical Engineering and Pressure Vessels and Piping Conference, Elevated Temperature Design Symposium, ASME, Mexico, 1976. p. 7.

WATANABE, J., *et al.*, **Temper embrittlement of 2¼Cr -1Mo pressure vessel steel in: ASME.** 29th Annual ASME Petroleum-Mechanical Engineering Conference, Dallas, Texas, USA, 1974.

VISWANATHAN, R. **Damage mechanisms and life assessment of high-temperature components.** 2nd ed. Metals Park, Ohio, USA: ASM Internacional, 1989. 503 p.

ZUMPARO JÚNIOR, P. **Tenacidade à fratura na ZAC de aços 2,25Cr-1Mo.** 2003. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

ZUMPARO JR., P., FERREIRA, I. **Tenacidade à fratura na ZAC afetada pelo calor de aços 2,25Cr-1Mo.** Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, 2004.