

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

DETERMINAÇÃO DE CRITÉRIOS PARA
ACEITAÇÃO DE MEDIÇÕES DE DUREZA REALIZADAS COM
DURÔMETROS PORTÁTEIS EM REGIÕES DE SOLDAS

Helton Claudio Bertol

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Especialidade Engenharia de
Inspeção de Equipamentos

Porto Alegre
2009

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

DETERMINAÇÃO DE CRITÉRIOS PARA
ACEITAÇÃO DE MEDIÇÕES DE DUREZA REALIZADAS COM
DURÔMETROS PORTÁTEIS EM REGIÕES DE SOLDAS

Helton Claudio Bertol
Engenheiro Mecânico

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, *Especialidade Engenharia de Inspeção de Equipamentos*.

Porto Alegre
2009

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, *Especialidade Engenharia de Inspeção de Equipamentos* e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientadora: Prof^a. Dra. Juliane Vicenzi (UFRGS)

Banca Examinadora:

Dr. Alexander Hiroshi Kasama, CENPES/PETROBRAS

Dr. Carlos Eduardo Aguiar Lima Rodrigues UN-RNCE/PETROBRAS

Dr^a. Érika Santana Mota Nicoletti, ENGENHARIA/TRANSPETRO

Prof. Dr. Carlos Perez Bergmann
Coordenador do PPGEM

À Luciana e Cecília.

AGRADECIMENTOS

À Petrobras pela oportunidade para a realização deste trabalho.

À Professora Dra. Juliane Vicenzi pela orientação do trabalho.

Aos Engenheiros Humberto Silva Campinho e Wilson do Amaral Zaitune pela orientação do trabalho no SEQUI/ Petrobrás, pelos ensinamentos, incentivo e pelo apoio.

Aos colegas do SEQUI – São José dos Campos: Daniele Cristina Chagas, pela grande colaboração em todas as etapas deste trabalho, Paulo Roberto da Silva, Cristiane Mariano Zavatti, Celso Kawasaki e Tiago Kaspariy pelas contribuições e sugestões para o trabalho. Aos colegas Valmir Manoel e Helder Carreiro pelo auxílio na fabricação e preparação dos corpos-de-prova e de dispositivos auxiliares.

Aos engenheiros Cristian Ramos Will, Genaro Zanon e Paulo Sérgio Gomes Pinto pelo companheirismo durante a realização do estágio vivencial em São José dos Campos.

À minha esposa Luciana pelo amor, incentivo e apoio em todos os momentos.

Aos meus pais Jaime e Lidir pelo amor e pelo exemplo de vida de trabalho e honestidade.

À empresa Tenaris Confab pelo fornecimento do material para a confecção de corpos-de-prova e pela disponibilização do laboratório e de equipamentos para a realização de ensaios.

À empresa GE Inspection Technologies pelo apoio técnico e pela disponibilização de equipamentos para a realização de ensaios.

Ao pessoal da oficina de manutenção da REVAP pela usinagem dos corpos-de-prova.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	XII
RESUMO.....	XIII
ABSTRACT	XIV
1.0 INTRODUÇÃO.....	1
2.0 OBJETIVOS	4
3.0 LIMITAÇÕES DO TRABALHO DE PESQUISA.....	5
4.0 REVISÃO DA LITERATURA.....	6
4.1 Ensaio para medição de dureza	6
4.1.1 Aspectos Gerais.....	6
4.1.2 Teste Vickers – dureza e microdureza	9
4.1.3 Medição de Dureza com Equipamentos Portáteis.....	12
4.2 Juntas Soldadas - Aspectos metalúrgicos Básicos	19
4.2.1 Aspectos Gerais.....	19
4.2.2 Zona termicamente afetada pelo calor (ZTA).....	21
5.0 MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
5.1 Aspectos gerais.....	23
5.2 Levantamento e análise sobre requisitos e recomendações relativos a ensaios de medição de dureza.....	23
5.2.1 Recomendações para realização de ensaios de dureza.....	25
5.2.2 Recomendações de procedimentos relativos a ensaios de dureza.....	26
5.2.3 Recomendações e requisitos para equipamentos e dispositivos empregados em ensaios de dureza.....	27
5.2.4 Recomendações e requisitos para corpos-de-prova e peças empregados em ensaios de dureza.....	27
5.3 Experimentos.....	27
5.3.1 Processos avaliados.....	27
5.3.2 Corpos de prova.....	28

5.3.3	Planejamento e execução de experimentos.....	29
6.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
6.1	Análise dos dados compilados sobre ensaios de medição de dureza.....	34
6.1.1	Análise sobre as recomendações para realização de ensaios	34
6.1.2	Análise sobre recomendações para procedimentos relativos aos ensaios	35
6.1.3	Análise sobre recomendações e requisitos para equipamentos e dispositivos empregados em ensaios	42
6.1.4	Análise sobre as recomendações para corpos-de-prova e peças empregados em ensaios.....	43
6.2	– Experimentos.....	45
6.2.1	Avaliação do desempenho de equipamentos portáteis em relação à exatidão e repetitividade.....	46
6.2.2	Avaliação do desempenho de durômetros portáteis em relação à posição de medição.....	49
6.2.3	Avaliação do desempenho de durômetros portáteis em relação à medição de dureza na zona termicamente afetada de soldas.....	53
7.0	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60
7.1	Considerações sobre os resultados relativos aos principais aspectos abordados no trabalho.....	60
7.2	Sugestões de critérios de aceitação de medições de dureza com equipamentos portáteis.....	64
8.0	CONCLUSÕES.....	65
9.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67

ANEXO I - Equipamentos utilizados no trabalho

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Esquema representativo do escopo do trabalho.....	2
Figura 1.2	Esquema representativo da estruturação do trabalho.....	3
Figura 4.1	Indentadores utilizados nos processos de medição de dureza Brinell, Rockwell e Vickers	6
Figura 4.2	Visor, penetrador e mesa de equipamento para medição dureza.....	10
Figura 4.3	Equipamento para medição de microdureza.....	11
Figura 4.4	Equipamento para medição de dureza pelo princípio UCI.....	13
Figura 4.5	Esquema representativo do princípio de medição UCI.....	14
Figura 4.6	Esquema representativo do princípio de medição Leeb Hardness.....	16
Figura 4.7	Equipamentos para medição de dureza pelo método Leeb Hardness.....	16
Figura 4.8	Equipamento TIV para medição de dureza.....	17
Figura 4.9	Tela do equipamento de medição de dureza – método TIV.....	18
Figura 4.10	Macroestrutura esquemática da seção transversal de uma solda em materiais metálicos.....	19
Figura 4.11	Estrutura da ZTA de um aço de baixo carbono (esquemática) A – região de crescimento de grão	21
Figura 5.1	Esquema ilustrativo das tabelas para compilação de dados.....	25
Figura 5.2	Planilha 1 – Recomendações para ensaios, condições para realização e critérios de aprovação.....	26
Figura 5.3	Esquema da divisão da junta soldada para obtenção dos corpos-de- prova.....	30

Figura 5.4 Esquema representativo dos corpos-de-prova utilizados para avaliação de exatidão, repetitividade	31
Figura 5.5 Representação esquemática de posições de medição; Dispositivo utilizado para posicionamento dos corpos-de-prova em ângulos de 45 e 135 graus.....	32
Figura 5.6 Esquema representativo de corpo de prova com solda.....	33
Figura 6.1 N 133 - Perfil para medições de dureza para chanfro duplo V.....	35
Figura 6.2 N 133 - Perfil para medições de dureza para chanfro V	36
Figura 6.3 NACE MR 0175 2003 / ISO 15156 -1 - Perfil para medições de dureza para chanfro V	37
Figura 6.4 Código ASME IX - Perfil para medições de dureza para chanfro V	38
Figura 6.5 N 1706- Perfil para medições de microdureza para chanfro duploV.....	38
Figura 6.6 N 1706- Perfil para medições de microdureza para chanfro V.....	38
Figura 6.7 Esquema representativo do tamanho de indentações proporcionadas pelos processos Leeb Harness e UCI.....	41
Figura 6.8 Representação esquemática - dureza nas diferentes regiões da ZTA.....	41
Figura 6.9 Representação esquemática - indentações realizadas por diferentes processos na zona de grãos grosseiros da ZTA.....	42
Figura 6.10 Médias de valores medidos por diferentes processos – corpos-de-prova da junta soldada - posição horizontal.....	47
Figura 6.11 Médias de valores medidos por diferentes processos – barras padrão para Poldi - posição horizontal.....	48
Figura 6.12 Médias de valores medidos por diferentes processos para diferentes posições de medição – corpos-de-prova da junta soldada.....	50

Figura 6.13 Diferenças das médias de medidas por diferentes processos em relação às medidas pelo processo Vickers.	53
Figura 6.14 Desvios padrão para diferentes posições de medição.....	53
Figura 6.15 Sondas utilizadas para medições através do processo Leeb Hardness.....	54
Figura 6.16 Corpo de prova utilizado para medições de dureza nas regiões de soldas.....	55
Figura 6.17 Corpo de prova utilizado para medições de dureza nas regiões de soldas.....	56
Figura 6.18 Medições realizadas na face lateral do corpo de prova.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 Distâncias mínimas para indentações, segundo ASTM E 92.....	36
Tabela 6.2 Tolerâncias para medições de dureza através de diferentes métodos.....	39
Tabela 6.3 Desvios das médias e desvios padrão de vários processos em relação ao processo Vickers – corpos-de-prova da junta soldada - posição horizontal.....	47
Tabela 6.4 Desvios das médias e desvios padrão de vários processos em relação ao processo Vickers – barras para teste Poldi - posição horizontal	49
Tabela 6.5 Médias das medições de diferentes processos para diferentes posições – corpos-de-prova da junta soldada.....	51
Tabela 6.6 Diferenças das médias e desvios padrão dos processos UCI, Leeb Hardness e TIV em relação ao processo Vickers para diferentes posições	52
Tabela 6.7 Valores aproximados de diagonais medidas nos experimentos.....	58
Tabela 6.8 Distâncias mínimas recomendadas para indentações segundo normas.....	58
Tabela 6.9 Estimativa para distâncias mínimas recomendadas para indentações	59

LISTA ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

d	[mm]	Média das diagonais de uma indentação
H	[mm]	Profundidade de penetração do indentador
H ₂		Hidrogênio
H ₂ S		Ácido sulfídrico
HB		Dureza Brinell
HL		Dureza Leeb
HV		Dureza Vickers
HRC		Dureza Rockwell
MB		Metal de base
P	[kgf]	Carga aplicada
R _a	[μm]	Rugosidade média
UCI		Ultrasonic Contact Impedance
TIV		Throug Indenter Viewing
ZF		Zona fundida
ZGG		Zona de grãos grosseiros
ZGM		Zona de grãos mistos
ZGF		Zona de grãos finos
ZTA		Zona termicamente afetada
Δt		Diferença de temperatura

RESUMO

A avaliação e verificação das propriedades mecânicas dos materiais empregados na indústria é uma das atividades de maior responsabilidade na engenharia. A realização dessas atividades depende do emprego de critérios estabelecidos por normas de associações de engenharia e também de normas internas de empresas, que determinam adaptações e exigências em função de características de projeto e de condições de utilização particulares de estruturas e equipamentos.

O objetivo principal deste trabalho é a determinação de critérios para aceitação de medições de dureza por meio de durômetros portáteis dentro da empresa Petróleo Brasileiro S.A.

A determinação destes critérios envolve, entre outros aspectos, a especificação de princípios de medição de dureza apropriados para diferentes situações, observação de recursos técnicos mínimos exigíveis de equipamentos portáteis e a observação, aprimoramento e especificação de procedimentos para a execução de medições de dureza.

É apresentada no trabalho uma compilação das exigências e recomendações de normas técnicas, recomendações da bibliografia e de fabricantes de equipamentos portáteis sobre a medição de dureza em metais com estes equipamentos.

É apresentada também uma discussão sobre pontos conflitantes e pontos obscuros de normas técnicas vigentes de diferentes instituições. Alguns aspectos, como posição de medição e avaliação de dureza na zona termicamente afetada de juntas soldadas, são analisados e discutidos com base em resultados de ensaios realizados.

A realização deste trabalho fornece subsídios para a revisão de normas da Petrobras, relativas a medições de dureza em regiões de solda, tanto em qualificações de procedimentos quanto para medições em campo.

ABSTRACT

Evaluation of the mechanical properties of materials used in industry is one of the most important activities in engineering. It depends on the use of criteria, developed by engineering associations, organizations for standardization and companies. The companies determine internal standards, changes and requirements for particular aspects of design and service of structures and equipment.

The main objective of this study is to determine criteria for acceptance of hardness measurements by means of portable instruments in Petrobras. This involves, among other aspects, the specification of principles for measuring hardness suitable for different situations, observation of minimum technical resources required for mobile devices and the improvement of measurement procedures.

Recomendation and requirements from different sources like standards, literature, articles and catalogs were gathered, analysed and discussed. Some aspects, such as measurement position, evaluation of hardness measurement in the HAZ of welded joints by portable instruments are discussed based on results of experiments.

The results obtained can be used as a source of information for the revision and improvement of internal standards in Petrobras, related to qualification of procedures and measurements realized in field.

1. INTRODUÇÃO

A avaliação e verificação das propriedades mecânicas dos materiais empregados na indústria é uma das atividades de maior responsabilidade na engenharia. A realização dessas atividades depende do emprego de critérios estabelecidos por normas de associações de engenharia e também de normas internas de empresas, que determinam adaptações e exigências em função de características de projeto e de condições de utilização particulares de estruturas e equipamentos.

Um dos ensaios mecânicos mais difundidos na indústria metal-mecânica é o ensaio de dureza. Além de ser um teste relativamente barato e rápido, é considerado como não destrutivo para muitas situações. A medida da dureza fornece resultados confiáveis a respeito de várias propriedades mecânicas dos materiais, como resistência mecânica e resistência ao escoamento. Propriedades como tenacidade, resistência ao desgaste e usinabilidade podem também ser estimadas a partir dos resultados destes testes.

Em algumas situações o ensaio de dureza é aplicado como um dos critérios de aprovação de peças e equipamentos, especialmente nas regiões de soldas. Exemplos são os vasos de pressão que trabalham expostos ao ácido sulfídrico (H_2S). Em muitas outras situações este tipo de ensaio desempenha fator importante.

Dependendo da natureza e das dimensões das peças ou equipamentos a avaliar, as medições de dureza podem ser realizadas em laboratórios ou em campo. Em laboratórios, no caso de aplicação para equipamentos como vasos de pressão, servem como parâmetro para a validação de procedimentos de soldagem. Fora do laboratório, são úteis em inspeções de fabricação e em campo, para verificações de rotina ou após a realização de reparos em equipamentos.

Para a medição de dureza em campo são necessários equipamentos portáteis. Há várias marcas e modelos de equipamentos disponíveis no mercado, que utilizam diferentes princípios de funcionamento. Alguns durômetros portáteis utilizam escalas para medição diferentes das convencionais como Vickers, Brinell e Rockwell. A maioria faz automaticamente a conversão dos valores medidos para essas escalas.

A necessidade de definição de critérios para aceitação de medições realizadas com equipamentos portáteis foi o motivo gerador deste trabalho. Para alguns processos de medição já existem normas específicas que regulamentam a utilização. Entretanto, de modo

geral há carência de informações sistematizadas com o objetivo de esclarecer as vantagens e limitações de diferentes processos. A maior parte das informações disponíveis neste sentido encontra-se em catálogos e artigos dos fabricantes de equipamentos.

O esquema apresentado na Figura 1.1 mostra o escopo deste trabalho.

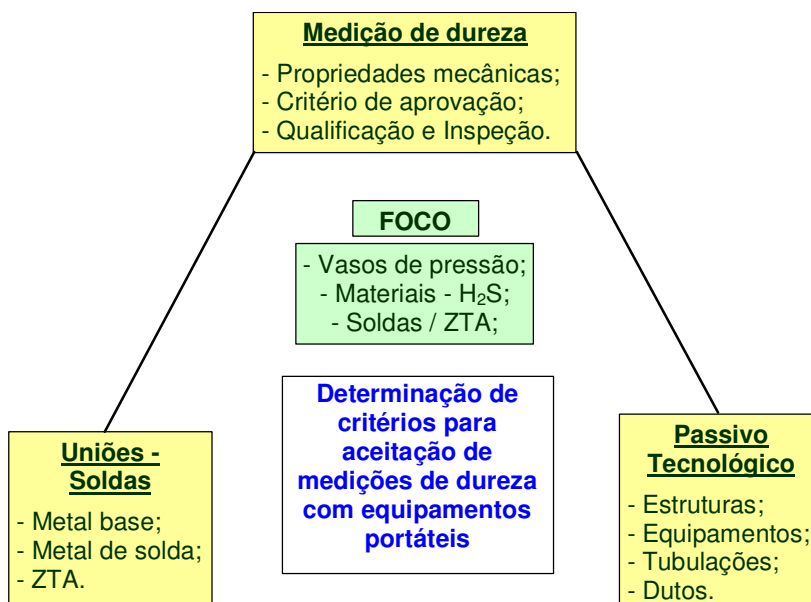


Figura 1.1 – Esquema representativo do escopo do trabalho

Para a definição do foco foram considerados os seguintes fatos:

- 1) A dureza é critério de aceitação de equipamentos mecânicos – no caso de vasos de pressão o limitante é a dureza máxima;
- 2) As soldas são regiões críticas para a avaliação dessa característica;
- 3) A região mais crítica da solda em relação à dureza é a zona termicamente afetada;

Para a realização deste trabalho foram empregados processos de medição de dureza que apresentam características comprovadamente adequadas ao tipo de aplicação proposto, (como Vickers) e processos cuja aplicação gera discussões a respeito da adequação para medição de dureza em soldas (Leeb Hardness e Microdureza).

A Figura 1.2 mostra um esquema da estratégia adotada para realização do trabalho.

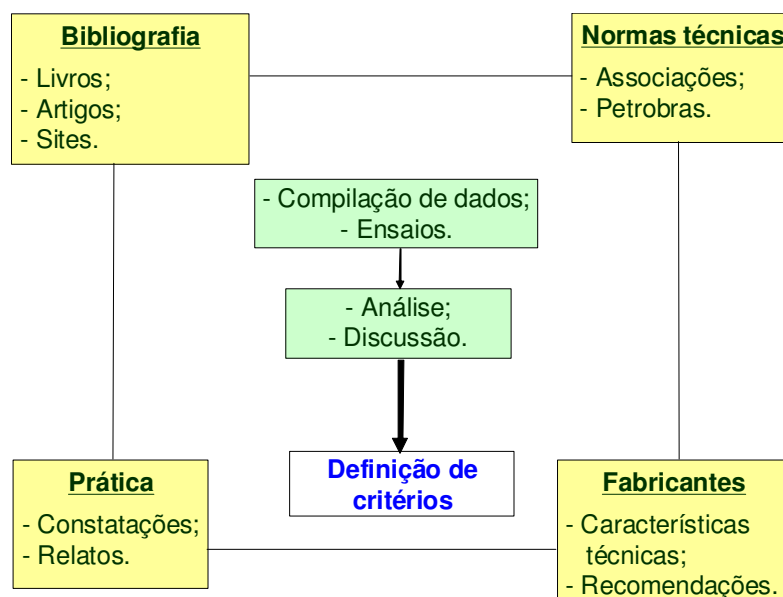


Figura 1.2 – Esquema representativo da estruturação do trabalho

Os quadros localizados na parte externa da Figura 1.2 (em amarelo) representam as fontes de informação utilizadas para uma compilação, sistematização e análise de dados relevantes relativos aos objetivos do trabalho. A partir desses dados e dentro das possibilidades técnicas, logísticas, financeiras e cronológicas, foram planejados e realizados ensaios de dureza visando verificação e complementação das informações levantadas.

Através da análise dos resultados dos ensaios e das informações levantadas foi possível a sugestão de alguns critérios para a aceitação de resultados obtidos através de medições realizadas com equipamentos portáteis.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal deste trabalho é a determinação de critérios para aceitação de medições de dureza por meio de durômetros portáteis na empresa Petróleo Brasileiro S.A.

2.2 Objetivo Específico

- Levantamento, compilação e análise de informações sobre ensaios de dureza;
 - Levantamento de informações sobre recomendações para ensaios de dureza na fabricação e montagem de vasos de pressão e sobre requisitos de materiais utilizados para vasos sujeitos a H₂S – em normas técnicas da Companhia e em códigos de projeto;
 - Levantamento sobre recomendações para a realização de ensaios de dureza – literatura, sites, códigos de projeto, normas relativas à inspeção em juntas soldadas e ensaios de dureza;
 - Levantamento de informações sobre equipamentos portáteis para a medição de dureza – literatura, fabricantes, normas;
 - Compilação e análise das informações – utilização de planilhas.
- Realização de experimentos
 - Planejamento de experimentos com base na análise das informações levantadas e na disponibilidade de materiais, recursos técnicos e tempo;
 - Realização de experimentos em laboratório, simulando algumas condições de utilização dos equipamentos portáteis em campo;
 - Tratamento e análise dos resultados dos experimentos;
- Análise conjunta dos resultados do levantamento de informações e dos experimentos para a sugestão de critérios para a aceitação de resultados de medições de dureza realizados através de equipamentos portáteis.

3. LIMITAÇÕES DO TRABALHO DE PESQUISA

A investigação técnica e científica realizada neste trabalho apresenta limitações quanto à sua interpretação. Entre estas, destacam-se:

- i) Não foram esgotadas as fontes utilizadas para o levantamento de informações. Buscou-se, dentro do tempo disponível, levantar, analisar e discutir o maior número de informações possível. A realização de um trabalho mais abrangente e com maior tempo de duração e com abordagem mais ampla pode fornecer informações e resultados complementares aos apresentados aqui;
- ii) Foram utilizados no trabalho equipamentos portáteis para a medição de dureza de apenas um fabricante. Procurou-se assim avaliar as diferenças de desempenho de diferentes princípios e técnicas de medição. Equipamentos de fabricantes diferentes dos utilizados no trabalho podem fornecer respostas diferentes daquelas aqui apresentadas;
- iii) Os corpos-de-prova utilizados para a realização dos experimentos foram fabricados a partir de blocos de aço laminado, utilizado para a confecção de esferas para armazenamento de gás. Esses materiais podem apresentar variações consideráveis de dureza devido à falta de homogeneidade, o que pode implicar em limitações nas análises de alguns resultados. Também pode implicar na necessidade de realização de um maior número de ensaios para que se obtenham resultados confiáveis;
- iv) O tratamento dos resultados é baseado em conceitos estatísticos simples. A análise estatística é, portanto, limitada.

4. REVISÃO DA LITERATURA

4.1 Ensaios para medição de dureza

4.1.1 Aspectos Gerais

O termo dureza, como é empregado na indústria, pode ser definido como a capacidade do material de resistir a uma deformação permanente quando em contato com um penetrador (ou indentador) sobre o qual é aplicada uma carga. Em geral um teste de dureza consiste na aplicação de carga em uma superfície através do penetrador, que tem geometria e propriedades conhecidas [1, 19].

A dureza dos materiais pode ser expressa através de várias escalas que, direta ou indiretamente, estão relacionadas à pressão aplicada para deformar a superfície testada. Os indentadores podem ser esféricos, piramidais ou cônicos [1, 19]. Pesquisadores e associações de engenharia desenvolveram métodos para conversão de escalas de dureza. Algumas normas apresentam valores tabelados, com equivalentes para diferentes escalas. Entre as mais utilizadas estão as normas ASTM E 140 e DIN EN ISO 18265.

Os testes de dureza mais difundidos para materiais metálicos são o Brinell, o Vickers e o Rockwell (Figura 4.1). O teste Brinell utiliza ponta do indentador esférica, o Vickers piramidal e o rockwell cônica. Os materiais mais comuns para fabricação dos penetradores são aço temperado, metal duro ou diamante [19].

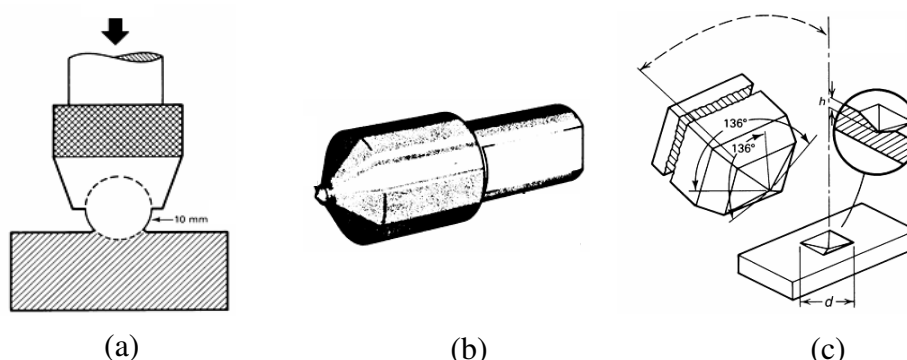


Figura 4.1 – Indentadores utilizados nos processos de medição de dureza Brinell (a), Rockwell (b) e Vickers (c) [1].

Em processos como Brinell e Vickers, a dureza é expressa pela relação entre a carga suportada e a área da indentação. A unidade dessas medidas é kgf/mm^2 . No teste

Rockwell, a profundidade da indentação para uma determinada carga é medida e convertida em um valor de dureza que é inversamente proporcional à profundidade obtida [1, 19].

A determinação da dureza dos metais constitui um método rápido, que permite avaliar as condições de fabricação e tratamento das ligas metálicas, as diferenças estruturais locais e a influência de elementos de liga [19]. O Ensaio de dureza é talvez o teste mais simples e de mais baixo custo para caracterização de materiais, pois não requer uma preparação elaborada da amostra. Os equipamentos empregados também são de baixo custo [1].

Embora a dureza não seja utilizada como parâmetro de projeto de peças, correlaciona-se com razoável aproximação com algumas propriedades mecânicas como resistência à tração, particularmente no caso dos aços [19]. Para metais, a dureza é diretamente proporcional à tensão de escoamento para a deformação imposta pela indentação. Propriedades como tenacidade, resistência ao desgaste e usabilidade, podem ser estimadas pela medição de dureza [1].

Investigações teóricas e empíricas resultaram em relações quantitativamente precisas também entre dureza e outras propriedades dos materiais, como coeficiente de encruamento, tensão de fadiga e de fluência.

Estas relações auxiliam na avaliação dessas propriedades com precisão suficiente para o controle de qualidade durante estágios intermediários e finais de fabricação. Em muitas situações o ensaio de dureza é a única alternativa disponível de teste não destrutivo para a qualificação e liberação de componentes para a aplicação ou operação.

Através de um conceito aparentemente simples, a dureza é uma propriedade que representa efeitos de complexos campos de tensões elásticas e plásticas induzidas no material testado.

Eventos microscópicos como movimentos de discordâncias e transformações de fases que podem ocorrer no material sob o indentador, não são necessariamente os mesmos para o mesmo material em diferentes indentações, mesmo que em condições idênticas. Entretanto, a experiência tem mostrado que indentações produzidas em condições idênticas de teste são aproximadamente idênticas macroscopicamente e as medições de suas dimensões produzem valores de dureza com repetitividade satisfatória [1].

Ensaio de dureza podem ser classificados através de vários critérios. Entre eles estão o tipo de medição, carga aplicada e natureza dos testes (por exemplo: estáticos, dinâmicos, ou riscamento).

Em relação ao tipo de medição, os testes podem ser classificados como medições que avaliam as dimensões das indentações (ex: Brinell, Vickers) e medições que avaliam a profundidade das indentações (ex: Rockwell).

A classificação também pode ser feita pelas denominações de testes tradicionais e testes instrumentados. Nos testes tradicionais são medidas a área de contato ou a profundidade de penetração para determinada carga aplicada. Os testes instrumentados permitem medições contínuas de cargas e deslocamentos.

Outra forma de classificação de testes de dureza é através da magnitude das cargas aplicadas para produzir as indentações. Em relação a esse aspecto, os testes de dureza podem ser classificados como macrodureza, microdureza e nanodureza.

Os testes classificados como macrodureza são aqueles que utilizam cargas de 1 kgf ou maiores. Testes Vickers podem utilizar cargas de 1 a 120 kgf. As cargas aplicadas em testes Rockwell variam de 15 a 150 kgf, dependendo do tipo de penetrador e da escala de medição utilizados. Para os testes Brinell, as cargas tipicamente aplicadas variam entre 500 e 3000 kgf [1].

Os testes de microdureza (Vickers e Knoop) empregam cargas menores, na faixa entre 1gf e 1 kgf, sendo mais comuns aplicações de cargas entre 100 e 500 gf. Estes testes são adequados para camadas de materiais com espessuras da ordem de 3mm.

O ensaio chamado nanoindentação ou indentação instrumentada depende de medição simultânea da carga e da profundidade da indentação produzida por cargas que podem ser de até 0,1 mN, com faixa de medições de 20 nm.

Os ensaios de dureza ainda podem ser classificados como estáticos, dinâmicos ou de riscamento. Todos os mencionados anteriormente são do tipo estático. Nos testes dinâmicos o penetrador, usualmente esférico ou cônico é lançado sobre a superfície do material a ser testado. A altura do penetrador depois de rebatido pela superfície é utilizada como parâmetro para medição de dureza. O escleroscópio é o ensaio mais popular desta classificação.

No teste de riscamento, um material com dureza conhecida é utilizado para riscar a superfície de outro material, com dureza desconhecida para determinar se este último é mais ou menos duro que o material de referência.

O teste que emprega correntes parasitas, que não está enquadrado em nenhuma das categorias citadas é um método sem contato e não utiliza penetrador. O método depende da medição de permeabilidade de correntes parasitas da camada superficial do material

testado. Essa permeabilidade é determinada pela estrutura do material e, portanto, pela dureza [1].

4.1.2 Teste Vickers – dureza e microdureza

O processo Vickers consiste na aplicação de um penetrador com ponta de diamante na forma piramidal com base quadrada sobre a superfície da peça de teste mediante a aplicação de cargas determinadas. Os ângulos de abertura da pirâmide são de 136 °. Após a retirada da carga, as diagonais da indentação são medidas e o valor da dureza é calculado pela relação entre a força aplicada e a área da indentação [1, 19].

Ensaio Vickers podem ser realizados para macro e microindentação [1, 19, 45] segundo a norma ASTM E 384, a carga aplicada para ensaios de microindentação, ou microdureza, varia entre 1 e 1000 gf. No teste padrão (norma ASTM E 92) são aplicadas cargas de 1 a 120 kgf. Há diferentes interpretações em relação às faixas de cargas utilizadas para este tipo de teste. Há registros na bibliografia de faixas que variam de 10 a 120 kg [19], 1 a 120 kgf [1] e 1 a 100 kgf [40].

A equação 4.1 representa a relação utilizada para determinação da dureza Vickers:

$$HV = 1,8544 P/d^2 \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Onde:

HV – Dureza Vickers (kgf/mm^2);

P – Carga aplicada [kgf];

d – média das diagonais da indentação [mm].

Tendo-se determinada a diagonal da indentação, a dureza Vickers pode ser calculada pela fórmula. Entretanto é mais conveniente o uso de tabelas de conversão. Alguns equipamentos possuem mostradores digitais que apresentam diretamente o resultado das medições (Figura 4.2). A indentação mostrada na Figura 4.2 foi realizada sobre um bloco padrão.

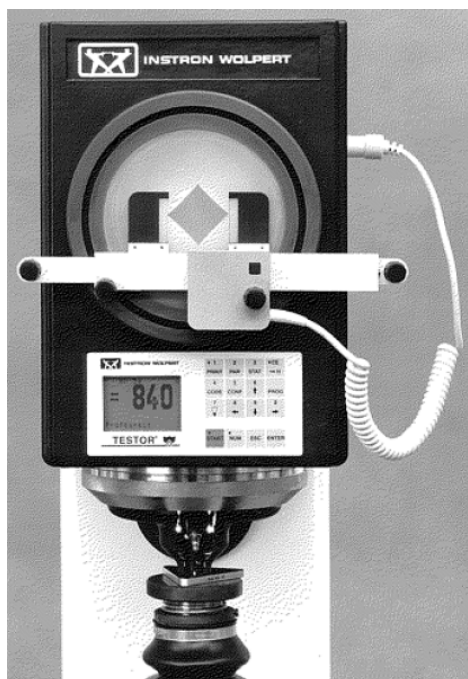


Figura 4.2 – Visor, penetrador e mesa de equipamento para medição de dureza [1]

Para o processo Vickers, carregamentos diferentes fornecem resultados praticamente idênticos para materiais homogêneos. Essa é uma vantagem em relação a outros processos que, em geral, exigem escalas diferentes para faixas de cargas diferentes.

Entre as vantagens do processo Vickers estão a possibilidade de realizar leituras precisas e o fato de que apenas um tipo de penetrador é utilizado para todos os tipos de metais e tratamentos de superfície. Comparativamente, um durômetro Vickers tem custo maior que equipamentos de medição semelhantes que empregam os processos Brinell e Rockwell [40].

Equipamentos empregados para testes Vickers devem ser verificados para pelo menos três forças, incluindo a especificada para o teste a ser realizado. O equipamento é considerado calibrado se o erro apresentado não é maior que 1%. As forças devem ser aplicadas suave e gradualmente, de modo que sejam evitados impacto e sobrecarga. A carga deve ser aplicada de modo a não causar nenhum movimento da peça durante a realização do teste.

A pirâmide de diamante utilizada como indentador é polida e fabricada com tolerâncias estreitas. Esta deve ser verificada periodicamente através da análise das características de indentações realizadas em superfícies polidas, com equipamento capaz de proporcionar aumento de 500 x.

Os exames visam à detecção de arredondamento e lascamentos nas arestas e na ponta do indentador de diamante ou outro tipo de dano. Uma imagem larga e brilhante da

ponta da indentação ou das diagonais indica desgaste excessivo. Manchas brilhantes que ocorrem geralmente nas diagonais, indicam a presença de lascamentos. A detecção de qualquer dano deve implicar na substituição do indentador.

O desenvolvimento do teste de microdureza se deve principalmente a fatores como limitações dos métodos de dureza, principalmente no que se refere à precisão dos resultados para peças de pequenas espessuras, necessidade de medições de dureza em peças de tamanho reduzido, necessidade de medições em pequenas áreas e da determinação de dureza de microconstituintes de ligas e de cristais simples [19].

O procedimento para a realização dos testes de microdureza é similar ao do processo Vickers, exceto pelo fato de que é realizado em escala microscópica e são utilizados instrumentos de maior precisão. A superfície a ser testada geralmente exige qualidade própria para ensaios metalográficos. Quanto menor a carga utilizada para o teste, mais altas as exigências em relação à qualidade da superfície necessária para a realização de testes.

Microscópios de precisão são empregados para as medições das indentações. Usualmente estes equipamentos possuem aumentos de 500 vezes e medem com exatidão de ± 0.5 micrometros. Nestes equipamentos, diferenças de ± 0.2 micrometros podem ser detectadas por operadores experientes [40].

A Figura 4.3 mostra um equipamento para medição de microdureza totalmente automatizado, com analisador de imagens e computador integrados para o tratamento dos resultados.



Figura 4.3 - Equipamento para medição de microdureza [1].

O desempenho de equipamentos para testes de dureza Vickers é geralmente verificado indiretamente através da verificação periódica com blocos padrão. Uma grande variedade de blocos padrão está disponível em diferentes faixas de dureza, calibrados com diferentes cargas de teste. É recomendável que cada carga empregada em um teste seja verificada através do uso de pelo menos dois blocos padrão de diferentes durezas.

As principais vantagens do processo Vickers são:

- Em geral a dureza Vickers é independente da força aplicada quando determinada em materiais homogêneos – exceto para cargas menores que 5 kgf;
- As quinas e limites das diagonais das indentações são em geral bem definidas;
- As indentações são simétricas, independentemente do tamanho;
- Uma escala contínua é utilizada para determinada força, de valores menores para maiores;
- A deformação do penetrador é desprezível para materiais duros.

As principais desvantagens são:

- O teste é lento. O tempo característico para indentação e medição é de aproximadamente 1 minuto
- Há exigências de cuidados em relação à preparação da superfície da peça a ser medida, especialmente para pequenas indentações.
- A exatidão das medições das diagonais depende de fatores relacionados ao operador do equipamento.

4.1.3 Medição de Dureza com Equipamentos Portáteis

A) Método da Impedância Ultra-sônica de Contato (UCI)

O método da impedância ultra-sônica de contato é um ensaio de dureza desenvolvido pelo Dr. Claus Kleesattel em 1961. O método é baseado na medição da alteração da frequência de uma barra ressonante, causada pela natureza elástica da área finita de contato entre a peça e o penetrador durante a penetração [10, 33].

Os equipamentos desenvolvidos para esse tipo de teste apresentam os valores medidos em escalas convencionais de dureza, como Vickers, Rockwell e Brinell. Podem ser empregados para componentes de diferentes tamanhos, em diferentes locações e em posições de difícil acesso.

Em geral, um equipamento para medição de dureza pelo princípio UCI é composto por:

- Uma sonda que contém uma barra com um penetrador (tipo Vickers, por exemplo)
- Um sistema de geração de vibração;
- Um sistema de detecção de vibração;
- Sistemas eletrônicos para avaliação numérica;
- Mostrador digital.

A Figura 4.4 mostra um equipamento de dureza para testes pelo princípio UCI, realizando a medição com a sonda fixada em um dispositivo auxiliar. Entretanto, nem sempre é possível a utilização desses dispositivos. Nesses casos, o posicionamento da sonda e a aplicação da carga são feitos manualmente.



Figura 4.4 – Equipamento para medição de dureza pelo princípio UCI [33]

Diferentes tipos de sondas podem ser empregados para esse tipo de teste. Esses dispositivos tipicamente cobrem uma faixa de carga de 1 a 98 N. Podem ter tamanhos variados, com sensores longos ou curtos para aplicações específicas. Podem ainda ser operadas manualmente ou equipadas com servo-motor para realização de testes automaticamente.

Neste tipo de teste, diferentemente dos testes convencionais, o tamanho das indentações produzidas não é determinado opticamente. A área de contato entre o indentador e a peça a ser avaliada é determinada pela medição eletrônica da alteração em uma ressonância ultra-sônica [10].

Durante a realização do teste, uma sonda que contém uma barra, na qual está fixado o indentador, é excitada em uma oscilação longitudinal ultra-sônica de aproximadamente 70 kHz pela ação de cristais piezoelétricos. A carga especificada é aplicada através da ação de uma mola. A ponta da barra penetra no material criando um contato elástico, que resulta em uma variação positiva da frequência na barra de oscilação (Figura 4.5).

Esta variação está relacionada à dimensão da área da indentação (área de contato entre o penetrador e o material). A dimensão da área, por sua vez é a medida da dureza do material testado, para um determinado módulo de elasticidade. Sendo assim, a variação da frequência é relativamente pequena para materiais duros, devido à pequena penetração do indentador no material testado, deixando assim uma pequena indentação. A variação da frequência é progressivamente maior quando o método é aplicado para materiais progressivamente mais macios [32].

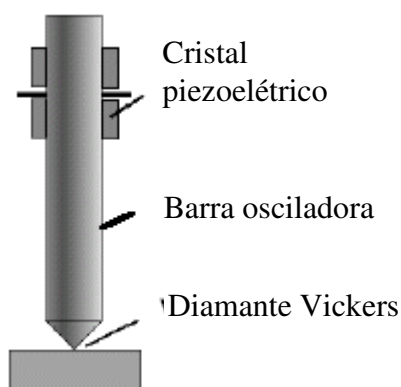


Figura 4.5 – Esquema representativo do princípio de medição UCI [32].

O equipamento monitora constantemente a frequência de ressonância e calcula a variação da frequência quando cargas especificadas são atingidas. O equipamento processa digitalmente as avaliações e cálculos e mostra os resultados instantaneamente.

A variação da frequência não depende somente da área de contato entre o indentador e o material, mas também do módulo de elasticidade dos materiais em contato. A utilização desses equipamentos para a medição de materiais com módulos de elasticidade diferentes depende de calibrações para faixas adequadas. Após a calibração, o método UCI pode ser aplicado para todos os materiais com módulos de Young dentro das faixas calibradas.

Em geral, esses equipamentos são calibrados na fábrica para aços não ligados e aços de baixa liga, pela utilização de blocos padrão certificados de acordo com a norma ASTM E 92 [10, 33].

B) Método da Dureza Leeb (rebote)

O teste de dureza pelo método Leeb é um teste classificado como dinâmico. Os resultados obtidos dependem das propriedades plásticas e elásticas dos materiais testados e do tratamento térmico pelo qual o material testado possa ter passado. Os valores medidos são indicativos da resistência mecânica dos materiais. A relação entre a velocidade de rebote e a velocidade de impacto é a medida da dureza do material testado [1, 9].

As velocidades de impacto e de rebote são medidas quando o corpo de impacto está a aproximadamente 1 mm de distância da superfície testada. Isso é realizado por meio de um magneto permanente montado no corpo de impacto que se move durante o teste através de uma bobina contida na sonda e induz uma voltagem elétrica nos movimentos de impacto e de rebote.

Essas voltagens induzidas são respectivamente proporcionais às velocidades de impacto e de rebote. O quociente entre essas voltagens medidas, multiplicado pelo fator de 1000, produz um número que representa o valor de dureza Leeb (Equação 4.2).

$$L = (\text{velocidade de rebote} / \text{velocidade de impacto}) * 1000 \quad (\text{Equação. 4.2})$$

O equipamento utilizado para a realização de testes pelo método Leeb Hardness consiste em:

- Um dispositivo de impacto equipado com uma esfera de metal duro ou um corpo com ponta de diamante, uma estrutura para medição de velocidade através de uma bobina de indução, um anel de suporte e um dispositivo eletrônico com mostrador digital para indicação dos resultados.

A Figura 4.6 mostra uma representação esquemática dos componentes de uma sonda para equipamentos que utilizam o princípio Leeb Hardness.

Há seis tipos de sondas normalizadas utilizadas para medição através deste princípio. São elas: D, DC, D+15, G, C e E, cada uma recomendada para determinados materiais e faixas de durezas. A sonda tipo D é a mais comum e é adequada para aplicações

em uma grande variedade de materiais [1, 9]. Todos os modelos utilizam uma esfera de metal duro ou uma ponta de diamante como penetrador do corpo de impacto [1].

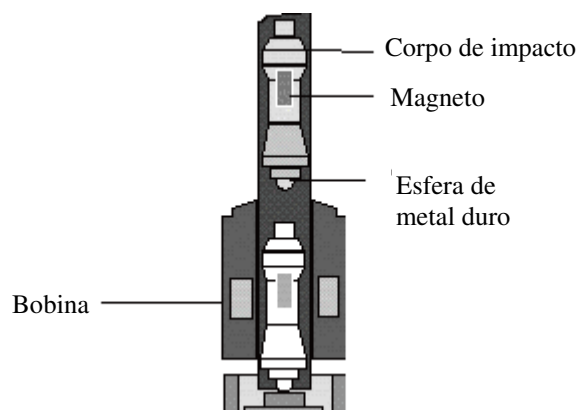


Figura 4.6 – Esquema representativo do princípio de medição Leeb Hardness [32].

Como a escala de dureza Leeb não é reconhecida universalmente, a maioria dos equipamentos faz transformação dos valores para escalas de dureza usuais. O problema com essas conversões é que elas são muito dependentes do material – geralmente são funções dos módulos de elasticidade dos materiais.

Sendo assim, muitos equipamentos fazem conversões distintas para diferentes classes de materiais. Aços, ferros fundidos, alumínio e bronze são alguns dos materiais que normalmente têm dados inclusos nos equipamentos [1]. Na Figura 4.7 são mostrados um equipamento para medição de dureza através do método do rebote, sondas e um bloco padrão de dureza.



Figura 4.7 – Equipamento para medição de dureza pelo método Leeb Hardness [33].

Medições em vários ângulos podem ser realizadas com estes equipamentos. A norma ASTM A 956 prevê fatores de correção para determinadas posições de medição, equipamentos modernos aplicam estes fatores de correção automaticamente.

O único método para verificação da calibração de durômetros Leeb é através da utilização de blocos padrão. O procedimento utilizado é a realização de dez medições nas superfícies dos blocos padrão e cálculo da média. Se a média ficar dentro da faixa de 13 pontos (ou valores) do valor especificado no bloco padrão, o equipamento é considerado calibrado [1].

C) Método da Visão através do Indentador (TIV)

TIV é um instrumento portátil utilizado para teste de dureza ótico de acordo com o método Vickers. Um sistema ótico que inclui uma câmera CCD que permite a visualização através do indentador de diamante. Dessa forma, a penetração do indentador na peça pode ser vista no mostrador do equipamento.

Tão logo a carga de teste é atingida, os comprimentos das diagonais da indentação são determinados e convertidos em valores de dureza de acordo com a definição do método Vickers. Essa avaliação pode ser realizada mecânica ou automaticamente.

O equipamento pode fazer conversão de escalas de dureza segundo as normas DIN 50150 e ASTM E 140. A visualização da indentação produzida permite, além do monitoramento da qualidade da indentação, a verificação da condição do indentador (diamante Vickers). A Figura 4.8 mostra um equipamento TIV para medição de dureza.



Figura 4.8 – Equipamento TIV para medição de dureza [33].

Segundo o fabricante do equipamento, este pode ser utilizado para medições em diferentes materiais sem a necessidade de calibração. Recomenda também a aplicação do equipamento para objetos de pequena espessura e para camadas de recobrimento.

Ainda segundo o fabricante, o método TIV permite a realização de testes em diferentes materiais sem nenhum tipo de calibração (independentemente do material) e em qualquer posição de medição. Também é adequado para a medição de peças leves e de baixa espessura [32, 33].

O software contido no equipamento determina, num primeiro passo, as bordas da indentação. As medidas das diagonais são determinadas com base nos pontos de interseção das quinas do diamante Vickers mostradas na tela. A média das diagonais é utilizada para o cálculo da dureza, segundo o método Vickers.

Na Figura 4.9 está mostrado o resultado de uma medição realizada através do método TIV. Por meio da imagem do mostrador é possível avaliar a qualidade da medição, podendo-se verificar se houve influência da qualidade da superfície da peça, da microestrutura do material ou de outros efeitos.

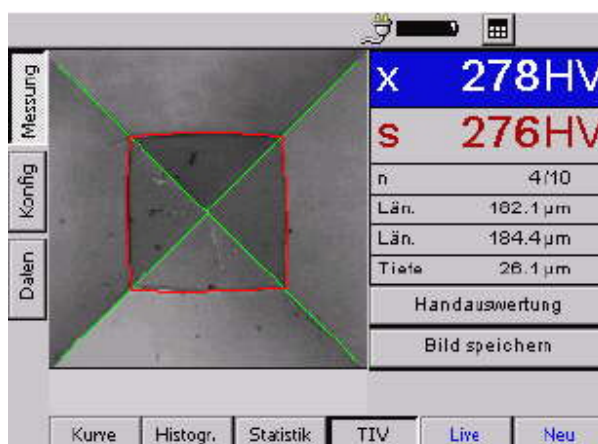


Figura 4.9 – Tela do equipamento de medição de dureza – método TIV [33]

O equipamento também permite a avaliação manual da indentação. As bordas da indentação podem ser ajustadas manualmente, utilizando-se uma imagem aumentada no mostrador digital. Feito isso, o comprimento das diagonais é automaticamente determinado e o valor da dureza mostrado.

O mostrador do equipamento permite também a verificação direta da condição do penetrador. Dessa forma, defeitos como quebras nas arestas podem ser identificados prontamente e, conseqüentemente, erros nas medições podem ser evitados.

O equipamento também tem recursos gráficos e funções estatísticas básicas. Os valores calculados de média e desvio padrão são mostrados ou atualizados durante as medições.

4.2 Juntas soldadas – aspectos metalúrgicos básicos

4.2.1 Aspectos gerais

As soldas realizadas por fusão em metais apresentam três regiões principais: Zona fundida (ZF), Metal de base (MB) e Zona Termicamente Afetada pelo Calor (ZTA) - Figura 4.10:

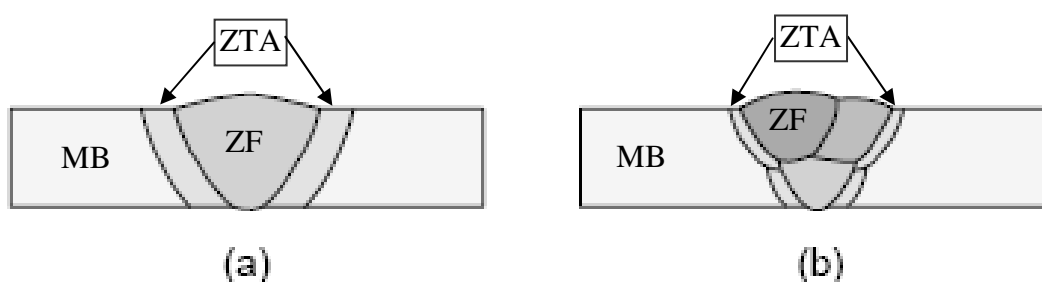


Figura 4.10 - Macroestrutura esquemática da seção transversal de uma solda em materiais metálicos – (a) passe único, (b) múltiplos passes [21].

Zona Fundida (ZF): região onde o material foi submetido aos processos de fusão e de solidificação durante a operação de soldagem. Os gradientes térmicos, as taxas de solidificação e as taxas de resfriamento na fronteira da poça de fusão determinam a estrutura do material da zona fundida [2, 20].

Zona Termicamente Afetada pelo Calor (ZTA): região da solda cuja microestrutura e/ou propriedades são alteradas pelo ciclo térmico de soldagem. As temperaturas de máximas atingidas nessa região são superiores à temperatura crítica do material e inferiores à sua temperatura de fusão. A temperatura máxima atingida (temperatura de pico) e as taxas de resfriamento determinam a estrutura da ZTA [2, 20].

Metal de Base (MB): região que não foi afetada pelo processo de soldagem. As temperaturas máximas atingidas nessa região são inferiores à temperatura crítica do material [2, 20, 21].

O ciclo térmico de soldagem influencia de forma importante às reações e alterações estruturais que ocorrem em uma dada região do material devido ao processo de

soldagem. O fluxo de calor na soldagem, responsável pelo ciclo térmico, pode ser dividido em duas etapas básicas: fornecimento de calor à junta e dissipação desse calor pela peça.

Na primeira etapa um parâmetro importante para caracterizar o processo é a energia de soldagem (ou aporte térmico) definida como a quantidade de energia fornecida à junta por unidade de comprimento da mesma. Na soldagem a arco, pode-se considerar o arco como a única fonte de calor.

Na segunda etapa, a dissipação do calor ocorre principalmente por condução, na peça, das regiões aquecidas para o restante do material. A evolução de temperatura em diferentes pontos, devido à soldagem pode ser estimada teórica ou experimentalmente. Cada ponto do material localizado próximo à junta experimentará uma diferente variação de temperatura, devido à passagem da fonte de calor [20].

A velocidade de resfriamento é particularmente importante na soldagem dos aços carbono. Estes materiais, quando aquecidos a temperaturas elevadas, sofrem austenitização na região da solda. No resfriamento, os produtos da transformação da austenita dependem fortemente das condições de resfriamento.

Os ciclos térmicos de soldagem e a distribuição de calor gerado dependem de diversas variáveis. As principais são:

Metal de base: metais e ligas de elevada condutividade térmica como o cobre e o alumínio dissipam rapidamente o calor da região da solda para o restante da peça, o que torna mais difícil a formação da poça de fusão. Materiais com menor condutividade térmica tendem a apresentar gradientes térmicos mais abruptos no aquecimento e menores velocidades de resfriamento. Nesses materiais, a energia térmica é melhor aproveitada para a fusão localizada necessária à soldagem.

Geometria da junta: considerando todos os outros parâmetros idênticos, quanto mais direções a junta oferece para a dissipação do calor, mais rápido será o resfriamento. Dessa forma, juntas em ângulo tendem a resfriar mais rapidamente que juntas de topo;

Espessura da junta: juntas de maior espessura facilitam o escoamento do calor da região de solda. Assim, para uma mesma condição de soldagem, quanto mais espessa a junta, mais rapidamente esta tenderá a se resfriar durante a soldagem. Essa condição é válida até uma espessura limite, acima da qual a velocidade de resfriamento não depende da espessura;

Energia de soldagem e temperatura inicial da peça: a velocidade de resfriamento é inversamente proporcional à energia de soldagem e à temperatura inicial da peça. A seleção

adequada destes parâmetros permite um certo controle sobre a velocidade de resfriamento e, portanto, sobre a microestrutura e propriedades. [20, 21].

4.2.2 Zona termicamente afetada pelo Calor (ZTA)

As características da ZTA de uma junta soldada dependem principalmente do metal de base, do processo e do procedimento de soldagem, dos ciclos térmicos e da distribuição do calor.

Na soldagem de materiais como alumínio e cobre, no estado recozido, a mudança estrutural mais importante é o crescimento de grão. No estado encruado, a ZTA apresentará uma região de crescimento de grão adjacente à ZF e uma região recristalizada, mais afastada. Em metais transformáveis como aços carbono e aços de baixa liga, a ZTA será mais complexa, conforme mostrado na Figura 4.11.

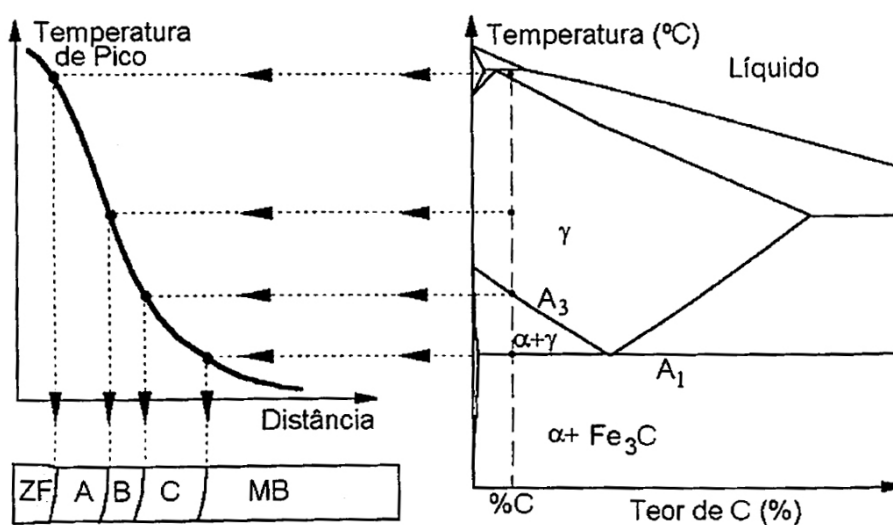


Figura 4.11 – Estrutura da ZTA de um aço de baixo carbono (esquemática) A – região de crescimento de grão, B- região de refino de grão, C – Região intercrítica [20]

Região de crescimento de grão: Compreende a região do metal de base mais próxima da solda, submetida a temperaturas entre cerca de 1200°C e a temperatura de fusão. Nesta região a estrutura austenítica sofre um grande crescimento de grão, que depende do tipo de aço e da energia de soldagem. Quanto maior a energia de soldagem, mais grosseiros serão os grãos formados. A estrutura final de transformação dependerá do teor de carbono e de elementos de liga em geral, do tamanho de grão austenítico e da velocidade de resfriamento. A granulação

grosseira dificulta a ocorrência de transformação durante o resfriamento, ou seja, aumenta a temperabilidade da região. Isto pode ser acentuado se o aço for ligado ou tiver um maior teor de carbono. De um modo geral a ferrita apresenta uma morfologia em placas e a presença de bainita nesta região. Condições de soldagem que resultem em uma maior velocidade de resfriamento, particularmente em aços ligados ou com maior teor de carbono, podem resultar em uma estrutura completamente martensítica. Essa região tende a ser a mais problemática da ZTA de um aço, podendo ter baixa tenacidade e ser um lugar preferencial para a formação de trincas. Para um dado material, espessura e tipo de junta, as condições de resfriamento e, portanto, a microestrutura, podem ser ajustadas pela seleção adequada das condições de soldagem, particularmente a energia de soldagem e a temperatura de preaquecimento da junta [2, 20].

Região de refino de grão: Compreende a porção da junta aquecida a temperaturas comumente utilizadas na normalização dos aços ou um pouco acima destas (900 até cerca de 1200 °C). Após o processo de soldagem, essa região é caracterizada, geralmente, por uma estrutura fina de ferrita e perlita, não sendo problemática na maioria dos casos.

Região intercrítica: nesta região, a temperatura de pico varia entre 727°C (temperatura eutetóide) e a linha A3, sendo caracterizada pela transformação parcial da estrutura original do metal de base. Nesta faixa de temperatura, somente uma parte do material é austenitizada e, portanto, alterada pelo ciclo térmico. Em alguns casos, particularmente na soldagem com vários passes, constituintes de elevada dureza e baixa tenacidade podem se formar nessa região.

Regiões mais afastadas do cordão de solda, cujas temperaturas de pico foram inferiores a 727°C, apresentam mudanças microestruturais cada vez menos perceptíveis [2, 20].

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Aspectos gerais

Para o estabelecimento de critérios de aceitação de medições de dureza realizadas com equipamentos portáteis foram considerados três aspectos principais:

1. **Estabelecer requisitos e recomendações que, na medida do possível, não apresentem conflitos com requisitos e recomendações de normas Petrobras e normas externas vigentes na companhia;**

Para a consideração desse aspecto é necessária a análise detalhada das normas internas e externas vigentes. Nos casos em que haja conflitos de recomendações entre normas e/ou aspectos não abordados, são tomados como referência as recomendações de normas formuladas com embasamentos técnicos considerados mais consistentes e mais adequados aos propósitos deste trabalho.

2. **Adequação dos processos de medição em relação à aplicação em diferentes regiões das peças, corpos-de-prova e equipamentos (metal base, ZTA e zona fundida de regiões soldadas);**

São observadas as dimensões e formas de indentações e as distâncias mínimas recomendadas entre as mesmas e destas às bordas de peças ou corpos-de-prova. São observadas também as relações entre dimensões de indentações e distâncias recomendadas com as dimensões das zonas termicamente afetadas de soldas.

3. **Avaliação de características técnicas e de desempenho para diferentes equipamentos e princípios de medição.**

São analisados aspectos como repetitividade, exatidão, facilidade de utilização em zonas restritas (posicionamento para medições na ZTA) e medições em diferentes posições (0, 45, 90, 135 e 180 graus em relação à horizontal).

5.2 Levantamento e análise sobre requisitos e recomendações relativos a ensaios de medição de dureza

Para viabilizar a compilação e análise de dados relativos à realização de ensaios de dureza, foram necessárias classificações de temas principais, das fontes de

informação, em função da natureza das mesmas, e de aspectos particulares relativos a determinados tópicos de análise.

Os quatro grandes temas adotados foram:

- Fabricação e montagem de vasos de pressão;
- Materiais para construção de equipamentos e dispositivos sujeitos à H_2 e H_2S ;
- Soldagem (qualificação de procedimentos e inspeção);
- Dureza.

As fontes de informação foram classificadas como:

- Literatura, artigos, sites especializados;
- Normas técnicas internas e externas;
- Manuais e catálogos de fabricantes de equipamentos;
- Constatações e relatos da prática sobre medições de dureza na Companhia.

Foram abordados quatro temas principais. Para cada tema foi elaborada uma planilha para a anotação dos dados levantados. A plotagem destes em linhas e colunas visa facilitar a comparação entre recomendações e requisitos de diferentes fontes para aspectos semelhantes.

Para a montagem das planilhas, as informações foram classificadas em:

- Tópicos ou temas;
- Variáveis;
- Recomendações e requisitos.

Os temas estão relacionados a indicações para realização de ensaios, procedimentos, exigências relacionadas a equipamentos e peças e corpos-de-prova utilizados para medições. A Figura 5.1 mostra um esquema geral simplificado das planilhas.

As planilhas foram montadas de modo que as informações coletadas possam ser classificadas de forma progressiva, ou seja, partindo-se de abordagens genéricas para particulares, conforme esclarecimento nos itens seguintes. Algumas variáveis são utilizadas em mais de uma planilha para facilitar a estratificação das informações.

Além da comparação entre requisitos e recomendações de diferentes fontes de informação, a análise das planilhas fornece requisitos para a confecção de corpos-de-prova utilizados na parte experimental deste trabalho. Dessa forma, pode ser otimizada a fabricação dos corpos-de-prova e de dispositivos necessários, atendendo-se aos requisitos de todas as normas e recomendações da bibliografia.

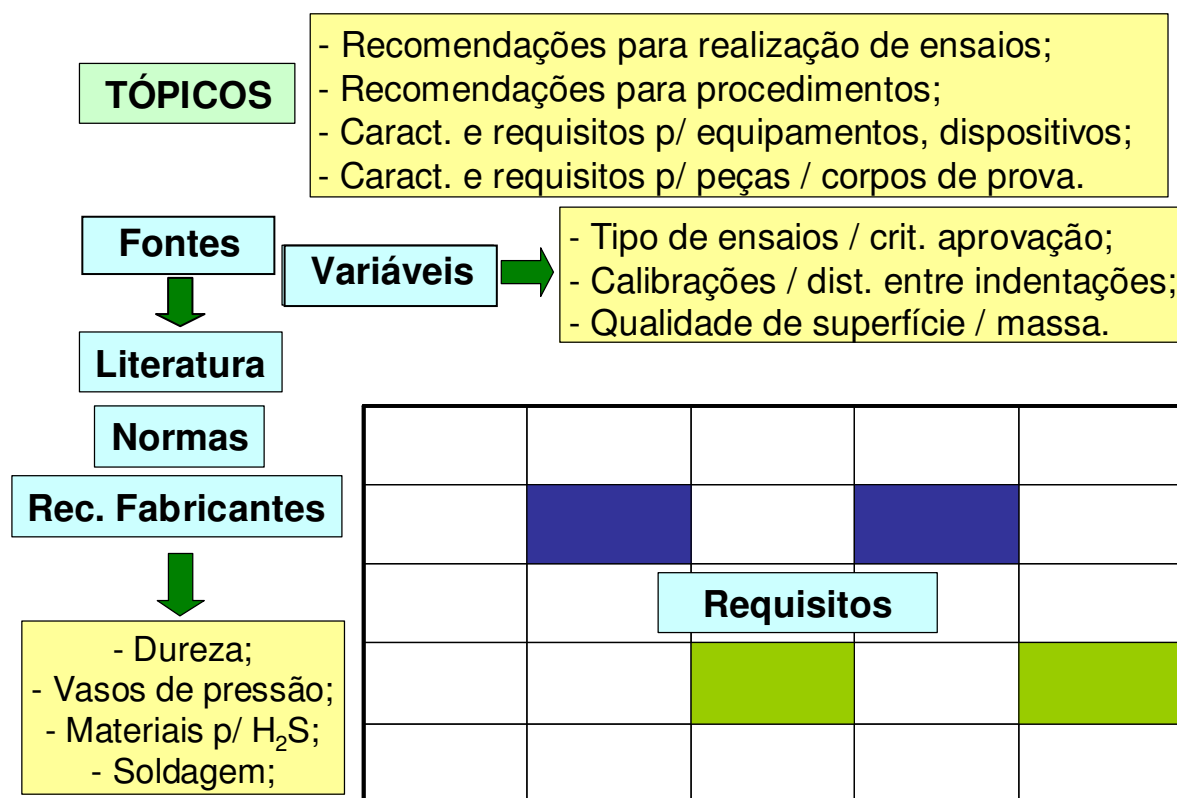


Figura 5.1 – Esquema ilustrativo das tabelas para compilação de dados

5.2.1 Recomendações para realização de ensaios de dureza (tópico 1)

Na planilha 1 (Figura 5.2) são anotadas todas as informações relevantes a respeito de recomendações para realização de ensaios constantes nas fontes consultadas. Essas informações foram retiradas principalmente de normas internas da companhia e de códigos de projeto referentes a vasos de pressão. Entretanto, na coluna das fontes são mostradas todas as fontes consultadas a título de ilustração. Para as demais planilhas a lógica utilizada é a mesma. As informações nesta planilha são estratificadas de acordo com as variáveis em: testes recomendados, condições para realização dos testes e critérios de aprovação.

Dependendo da maneira com que as informações estavam apresentadas e do nível de detalhe disponível em cada fonte consultada, as informações foram também utilizadas nas planilhas 2, 3 e 4.

Variáveis Fontes	Testes de dureza recomendados	Condições para realização dos testes	Critérios de aprovação
N - 268			
N - 269			
ASME VIII			
ASME IX			
N1704			
N1706			
NACE MR 0175 2003			
N133			
ASTM A370-08a			
ASTM 92 E 92-82 (03)			
ASTM E 384-08a			
ASTM A 956 - 06			
ASTM A 1038 - 08			
ASTM E 110-82 (02)			
Rec. Fabricantes			
Rec. Literatura			

Figura 5.2 – Planilha 1 – Recomendações para ensaios, condições para a realização e critérios de aprovação.

5.2.2 Recomendações de procedimentos relativos a ensaios de dureza (tópico 2)

Parte das informações relativas a procedimentos é estratificada a partir das informações plotadas na planilha 1 e parte de normas específicas para determinados processos de medição de dureza.

Entre os fatores importantes a serem analisados estão as distâncias mínimas recomendadas entre indentações e destas para pontos de referência, como bordas de corpos-de-prova ou metal de solda. Recomendações para arranjo ou posicionamento relativo entre as indentações são também anotadas.

Também são importantes as recomendações e restrições a respeito de posições para medições, visto que as medições realizadas na fabricação de equipamentos ou em campo muitas vezes são efetuadas em posições diferentes da horizontal.

As variáveis consideradas nesta planilha são: tipo de teste, calibração e verificação dos equipamentos, regiões de análise (metal base, ZTA e metal de solda), cargas aplicadas, distanciamento mínimo entre indentações, destas às bordas da peça e à zona fundida, posições de medição.

5.2.3 Recomendações e requisitos para equipamentos e dispositivos empregados em ensaios de dureza (tópico 3)

Nessa planilha são plotadas informações referentes a aspectos relevantes de equipamentos e dispositivos auxiliares utilizados na execução de medições de dureza. As variáveis consideradas são: tipo de equipamento, aspectos construtivos, recomendações sobre operação, dispositivos auxiliares, limitações e recomendações para aplicação dos mesmos.

5.2.4 Recomendações e requisitos para corpos-de-prova e peças empregados em ensaios de dureza (tópico 4)

As informações plotadas na planilha 4 são relacionadas especificamente às peças ou corpos-de-prova, nos quais são efetuadas as medições de dureza. São na maioria provenientes de normas específicas para determinados processos de medição de dureza.

As variáveis analisadas são: materiais, massa, espessura mínima, qualidade dimensional, geométrica e de superfície e posição de medição.

5.3 Experimentos

A parte experimental deste trabalho teve como objetivo a obtenção de dados que complementem as informações obtidas a partir do levantamento de informações. A análise da soma dos resultados dessas duas abordagens é a base para determinação dos critérios de aceitação de medições de dureza com equipamentos portáteis.

No planejamento dos experimentos foram consideradas a avaliação de pontos previamente determinados pelas necessidades da companhia e também a verificação de requisitos e recomendações de diferentes normas sobre determinados aspectos.

Um dos pontos principais está relacionado à adequação de determinados processos para medições na zona termicamente afetada de soldas. O posicionamento relativo das indentações e destas em relação às bordas de corpos-de-prova e metal de solda também foi avaliado.

Outros pontos avaliados são o desempenho de equipamentos portáteis em relação à exatidão e repetitividade e em relação a medições em diferentes posições, simulando-se as condições de campo.

5.3.1 Processos avaliados

Os processos de medição de dureza utilizados neste trabalho são:

- Vickers HV5 – Durômetro de bancada (utilizado como referência);
- Vickers HV1 – Microdurômetro (bancada);
- Ultrasonic Contact Impedance – UCI (portátil);
- Leeb Hardness (portátil);
- Through Indenter Viewing – TIV – (portátil).

Estes processos foram escolhidos principalmente pelas seguintes razões:

- O processo Vickers HV5 é o mais citado por normas internas e externas para a utilização em qualificações de procedimentos de soldagem. Outra razão é o fato de que a estabilidade e robustez dos equipamentos de bancada reduzem as incertezas dos resultados. Estes fatos justificam a utilização dos resultados desta técnica como referência para avaliação do desempenho dos demais equipamentos.
- O processo de micro dureza foi escolhido pelo fato de constar como recomendação para qualificação de procedimento de soldagem normas da companhia. Há controvérsias quanto à utilização desse processo para a medição de dureza na ZTA de soldas.
- O processo UCI é um dos mais utilizados pelas empresas contratadas para a medição de dureza em campo de equipamentos da companhia.
- O processo Leeb Hardness também é utilizado para medições em campo. O emprego deste processo gera controvérsias quanto à utilização para medições em ZTA's.
- O processo TIV é um processo relativamente novo e que ainda não tem normatização específica.

5.3.2 Corpos-de-Prova

A definição dos materiais e da forma dos corpos-de-prova a serem utilizados nos experimentos foi baseada em aspectos técnicos, custos, logística, e tempo disponível para a fabricação dos corpos-de-prova e de dispositivos auxiliares. Optou-se pela utilização de materiais que tivessem acesso fácil e rápido.

As vantagens dessa estratégia são principalmente baixo custo e tempo menor para obtenção dos mesmos. As desvantagens são o risco de se obter materiais que apresentem variações consideráveis de dureza devidas à falta de homogeneidade. Isso pode implicar em limitações nas análises de alguns resultados. Também pode implicar na necessidade de realização de um maior número de ensaios para que se obtenham resultados confiáveis.

O estudo preliminar das normas sobre ensaios realizados com a utilização de equipamentos portáteis revelou que, para materiais considerados não homogêneos, o número

de indentações recomendado nas medições de dureza é o dobro do utilizado para materiais homogêneos.

5.3.3 Planejamento e execução de experimentos

A estratégia adotada para a execução dos experimentos e análise dos resultados foi baseada em três aspectos principais:

1. Adotar um processo como referência.
2. Medir todos os corpos-de-prova com o processo de referência.
3. Avaliar as variações dos resultados de diferentes processos em relação aos resultados do processo de referência.

O processo adotado como referência foi o Vickers – durômetro de bancada, com carga de 5 kg. Este é o processo recomendado pela maioria das normas para a qualificação de procedimentos de soldagem.

Os resultados obtidos através do processo de referência podem ser tomados como o melhor que pode ser atingido em termos de exatidão e dispersão dos resultados. Para a avaliação do desempenho de diferentes equipamentos portáteis em posições diferentes da horizontal é necessária a comparação direta entre os resultados destes equipamentos.

Os aspectos avaliados através da realização dos experimentos estão descritos nos itens abaixo:

- A) Avaliação comparativa do desempenho dos equipamentos e processos em relação à exatidão e repetitividade;
- B) Avaliação da influência da variação da posição de medição nos resultados;
- C) Avaliação do desempenho de diferentes processos em relação às formas e dimensões das indentações.
- D) Avaliação do desempenho de diferentes processos para níveis de dureza diferenciados nas regiões de solda.

Para atender às necessidades relativas às avaliações propostas, foi determinada a utilização de dois tipos de corpos-de-prova:

- Barras utilizadas como padrão para ensaios tipo Poldi;
- Material utilizado para a fabricação de vasos de pressão.

As barras padrão utilizadas para ensaios Poldi foram adotadas pelo fato de terem dureza teoricamente constante. Foram selecionadas barras com dureza nominal de 250 HB (aproximadamente 263 HV, segundo ASTM E 140 - 07). Esta dureza é a limite permitida

para materiais utilizados na fabricação de vasos de pressão sujeitos a H₂S (N1706). As barras têm seção quadrada de 16 mm e comprimento de 160 mm.

O material utilizado para a confecção dos demais corpos-de-prova foi uma junta soldada de chapas de aço ASTM A 516 GR 70, típico para aplicações em vasos de pressão sujeitos à H₂S. O processo de soldagem a que a junta foi submetida é o de eletrodos revestidos. O bloco original tem dimensões de 300 mm (largura) x 200 mm (comprimento) x 60 mm (altura).

Parte do bloco foi cortada em blocos menores, com dimensões de 100 mm x 30 mm x 60 mm. Os blocos da parte central da junta têm as soldas em duplo V, que apresentam largura máxima de aproximadamente 40 mm (Figura 5.3).

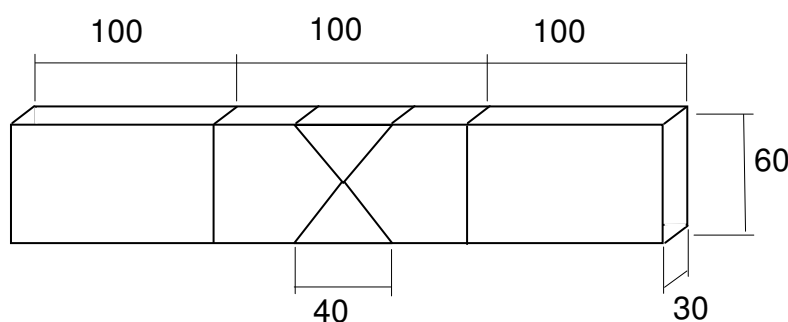


Figura 5.3 – Esquema da divisão da junta soldada para obtenção dos corpos-de-prova – dimensões em mm.

Os corpos-de-prova foram preparados de modo a atender às exigências das normas consultadas referentes a diferentes ensaios. Foram observados aspectos como planicidade, paralelismo, massa, espessura mínima e qualidade de superfície. As medições relativas à qualidade de superfície e geométrica foram realizadas em 3 de 10 corpos-de-prova utilizados no trabalho, tendo sido apenas submetidos ao lixamento, com lixa grana 280. Todos os resultados estão dentro dos limites exigidos pelas normas para os respectivos requisitos.

Os corpos-de-prova obtidos a partir dos blocos laterais foram utilizados para as avaliações descritas nos itens A e B listados anteriormente. Os blocos centrais foram destinados a corpos-de-prova para a avaliação do item C. As barras padrão para ensaios Poldi também foram utilizadas para a avaliação proposta no item D.

Os corpos-de-prova provenientes da junta soldada foram fabricados por usinagem (serramento e fresamento). A preparação da superfície foi realizada com lixamento

granulometria final de 280. Nos corpos-de-prova que apresentavam soldas foram realizados polimento e ataque químico leve (Nital 1%) para facilitar a visualização da ZTA.

A seguir são descritos os ensaios realizados, relacionados aos quatro itens propostos para avaliações:

A) Avaliação do desempenho dos equipamentos e processos em relação à exatidão e repetitividade;

- Corpos-de-prova sem união soldada;

- Posição horizontal (condição ideal);

- Três faces medidas – as mesmas para todos os processos - 6 pontos cada face para o processo referência e para processo de microdureza e 10 pontos cada face para os demais.

- Barras padrão para ensaios tipo Poldi;

- Posição horizontal (condição ideal);

- Uma face medida – 30 pontos

Os erros sistemáticos e a dispersão de cada processo em relação ao de referência são avaliados através da comparação das médias e dos desvios padrão observados.

A Figura 5.4 mostra um esquema de um corpo-de-prova de metal de base. As Figuras geométricas de diferentes formas e cores representam as indentações de diferentes processos de medição.

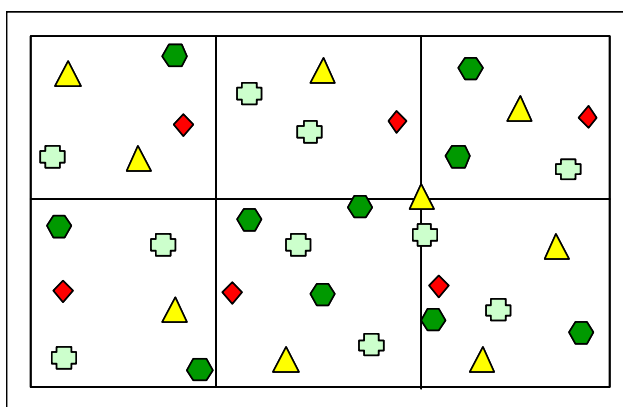


Figura 5.4 – Esquema representativo dos corpos-de-prova utilizados para avaliação de exatidão e repetitividade

B) Avaliação da influência da variação da posição de medição nos resultados;

- Na Figura 5.5 (a) estão mostradas esquematicamente as posições de medição.

Na parte (b) é mostrada a peça fixada a um dispositivo para medições a 45 e 135°;

- Para cada posição de medição são utilizados três corpos-de-prova;
- Todos os corpos-de-prova (de todas as posições de medição) são medidos pelo processo referência na posição horizontal.
- Três faces medidas - 6 pontos cada face para o processo referência e para processo de microdureza e 10 pontos cada face para os demais.

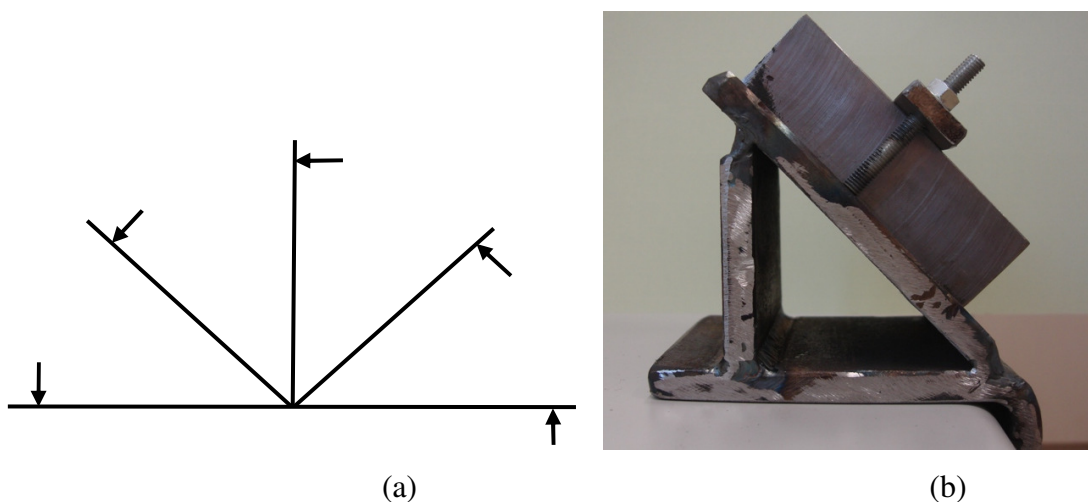


Figura 5.5 – (a) Representação esquemática das posições de medição. (b) Dispositivo utilizado para posicionamento dos corpos-de-prova em ângulos de 45 e 135 graus

- Os erros sistemáticos e a dispersão de cada processo em relação ao de referência são avaliados através da comparação das médias e dos desvios padrão observados.
 - Através da comparação dos resultados de um mesmo equipamento/processo para cada posição de medição, pode ser analisado o desempenho deste para diferentes posições.
- C) Avaliação do desempenho de diferentes processos em relação às formas e dimensões das indentações;
- A avaliação deste item é realizada através da comparação das recomendações e exigências constantes nas fontes consultadas e os valores efetivos medidos nos corpos-de-prova ensaiados;
 - Avaliação de aspectos como o distanciamento mínimo entre indentações e destas às bordas dos corpos-de-prova;
 - Comparação do desempenho de diferentes equipamentos/processos para medições na ZTA em relação a limitações de espaço (dimensões da ZTA);

- Análise da adequação de diferentes processos em função das variações metalúrgicas da ZTA (dimensões das indentações versus dimensões e variações de dureza das subcamadas da ZTA);

A Figura 5.6 mostra um esquema de um corpo de prova de uma junta soldada. As Figuras geométricas de diferentes cores representam as indentações de diferentes processos de medição.

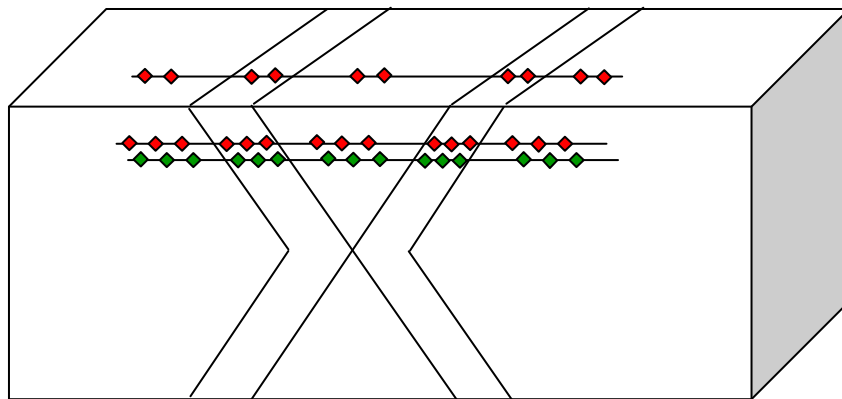


Figura 5.6 – Esquema representativo de corpo-de-prova com solda

D) Avaliação do desempenho de diferentes processos para níveis de dureza diferenciados nas regiões de solda.

- Medições de dureza em barras padrão de Poldi
 - Somente 1 corpo de prova - 30 medições para cada processo;
 - Avaliação da exatidão e do erro sistemático (mesmo procedimento realizado para os corpos-de-prova de metal base – item A)
 - Comparação destes resultados com os do item A.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Análises e cálculos baseados na compilação de dados sobre ensaios de medição de dureza

6.1.1 – Análise sobre a recomendação de ensaios – planilha 1

As normas N-268 e N-269, referentes à fabricação e montagem de vasos de pressão da Petrobras e que são o ponto de partida para o levantamento, fazem referência à norma interna de soldagem (N 133), aos códigos de projeto ASME VIII e IX, à norma ASTM E 92 (dureza Vickers), assim como à norma reguladora NR13.

Em relação aos procedimentos utilizados para qualificação de processos de soldagem, recomendam o emprego de testes de dureza Vickers HV5 ou HV10 (segundo ASTM E 92) e prevêm a possibilidade de realização de testes com equipamentos portáteis para medições realizadas em campo ou em inspeções de fabricação.

Os critérios para aceitação das medições realizadas com equipamentos portáteis não estão claramente definidos, uma vez que o texto expressa como exigência a obtenção de resultados “similares” aos apresentados pelo processo convencional. Nesse caso, a similaridade é definida pela Companhia. Essa constatação reforça a necessidade de definição de critérios para a aceitação desses testes.

As normas internas N-1704 e N-1706, referentes a requisitos adicionais para materiais sujeitos a H_2 e H_2S , respectivamente, referenciam a norma N-133 no que tange às recomendações relativas a corpos-de-prova e procedimentos para a realização de ensaios de dureza nas regiões de solda. Sobre a utilização de equipamentos portáteis, apresentam as mesmas recomendações contidas nas normas de fabricação e montagem de vasos de pressão.

A maioria das fontes analisadas recomenda a realização de ensaios de dureza Vickers, com cargas de 5 e 10 kgf. Exceções são as normas N 1706 e NACE MR 0175 2003 / ISO 15156 -1. A primeira recomenda microdureza com carga de 500 gf para a qualificação. A segunda apresenta como alternativa o emprego de dureza Rockwell superficial, com carga de 15kgf (escala tipo 15N), além da recomendação de emprego de HV 5 ou HV10.

Os critérios de aprovação das normas internas da Petrobras são mais conservativos que os da norma NACE. Dependendo da classe dos vasos de pressão analisados, os limites aceitáveis para as normas internas vão de 210 a 250 HV. Para vasos empregados em meios não agressivos o limite é de 280 HV. Para a norma NACE, a dureza

máxima permitida para equipamentos sujeitos à ação de H_2S é de 22 HRC, ou seja, aproximadamente 250 HV (segundo norma ASTM E 140).

Nos itens seguintes são apresentadas considerações sobre as recomendações referentes a procedimentos de testes, corpos-de-prova, equipamentos e dispositivos empregados.

6.1.2 – Análise sobre recomendações para procedimentos - planilha 2

O levantamento de informações sobre procedimentos para realização de ensaios expôs alguns pontos conflitantes entre algumas normas. Os principais referem-se às recomendações para o posicionamento das indentações na zona termicamente afetada das soldas e à distância mínima entre as indentações e destas às bordas das peças ou corpos-de-prova.

As normas internas de projeto e montagem de vasos de pressão recomendam que os ensaios de dureza sejam realizados em concordância com as recomendações da norma ASTM E 92. No caso de serem utilizados equipamentos portáteis, recomendam a análise da similaridade dos resultados obtidos com esses equipamentos em relação aos obtidos pelo processo Vickers. O posicionamento das indentações deve ser de acordo com a norma interna de N-133 (soldagem), que os especifica somente para qualificação de procedimentos de soldagem (Figuras 6.1 e 6.2).

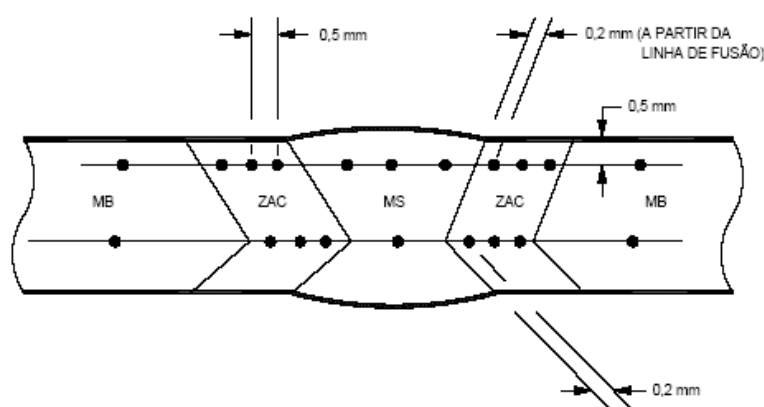


Figura 6.1 – N 133 - Perfil para medições de dureza para chanfro duplo V [26].

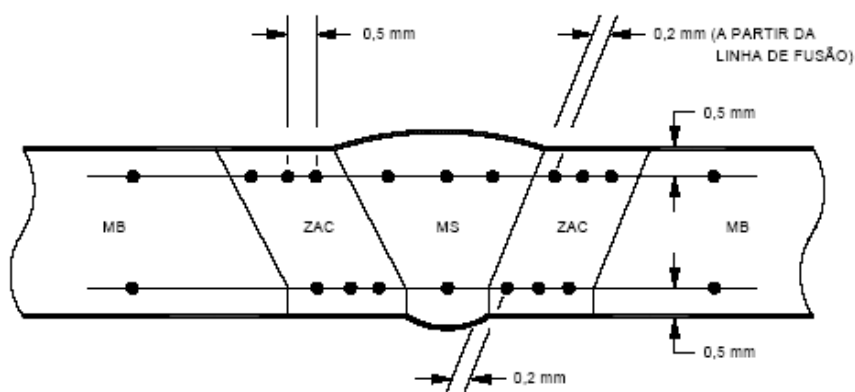


Figura 6.2 – N 133 - Perfil para medições de dureza para chanfro V [26].

A norma ASTM E 92 recomenda como distância mínima de 2,5 vezes a média das diagonais entre o centro de uma indentação e a borda de outra ou à borda da peça.

A norma reproduz o conceito teórico de que a dureza Vickers pode ser calculada segundo a expressão $HV=1,8544 \cdot P/d^2$, onde P é a carga aplicada em kilogramas força e d é a média das diagonais da indentação em milímetros.

Considerando-se que o limite de dureza permitido para vasos de pressão aborçados neste trabalho é de 250 HV e que a dureza mínima aproximada de aços adequados para esse propósito é da ordem de 150 HV, chega-se a valores mínimos recomendados para distâncias entre indentações e dessas às bordas de peças (Tabela 6.1).

Tabela 6.1 – Distâncias mínimas para indentações, segundo ASTM E 92

Cargas aplicadas	Dureza do material	
	150 HV	250 HV
5 kgf	0,623 mm	0,483 mm
10 kgf	0,88 mm	0,683 mm

Pode-se observar que, para os materiais considerados neste trabalho, as distâncias mínimas calculadas com base na norma ASTM E 92 não são atendidas nas recomendações da norma N-133. Considerando-se o limite superior de dureza utilizado como critério de aprovação, a distância mínima entre a linha de fusão da solda e a primeira indentação deveria ser de no mínimo 0,483 mm para uma carga de 5 kgf. Na região do metal de base, onde a dureza é menor, a distância mínima recomendada é ainda maior.

O distanciamento praticável entre as indentações também depende da largura da ZTA que, por sua vez, depende de fatores como material soldado, espessura da junta, processo de soldagem empregado, parâmetros de soldagem utilizados e outros.

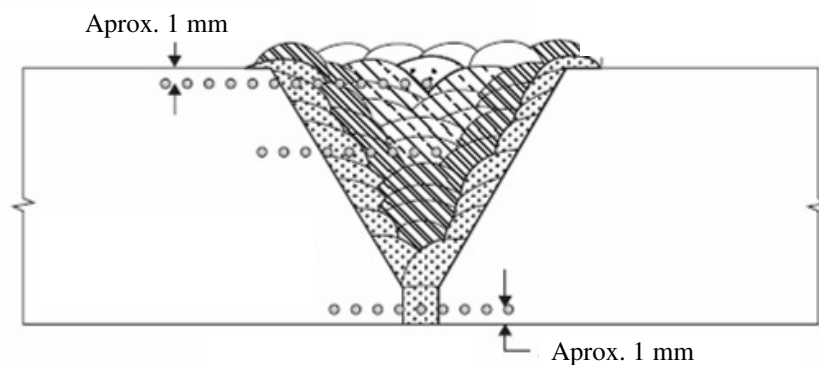


Figura 6.4 Código ASME IX - Perfil para medições de dureza para chanfro V [4].

A norma N 1706 recomenda o processo de microdureza Vickers com carga de 500 gf para a qualificação de procedimento de soldagem. Para medições em campo ou inspeções de fabricação o processo recomendado é Vickers com cargas de 5 ou 10 kgf. O posicionamento e a distribuição das indentações recomendados são similares ao da norma N133. A diferença está no fato de não haver especificação da distância entre as indentações na ZTA (Figuras 6.5 e 6.6).

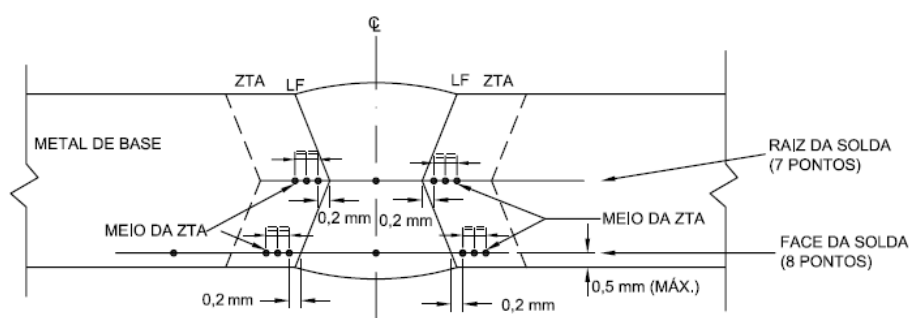


Figura 6.5 - N 1706- Perfil para medições de microdureza para chanfro duploV [30].

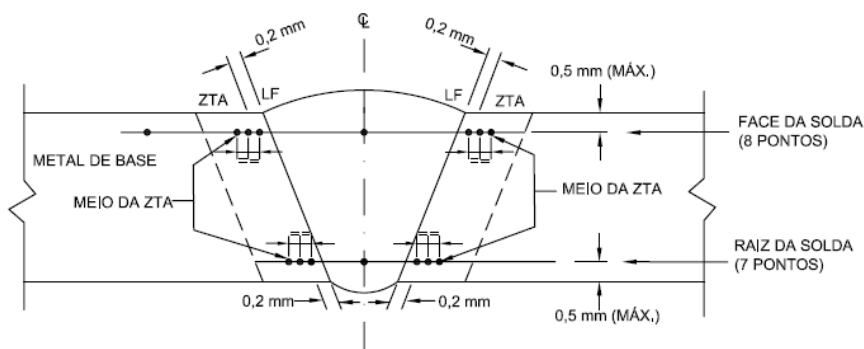


Figura 6.6 N 1706- Perfil para medições de microdureza para chanfro V [30].

O cálculo das distâncias mínimas necessárias entre indentações e destas às bordas das peças, realizado pela fórmula da dureza utilizada para o processo Vickers (ASTM E 92), mostra que, para a carga recomendada (500 gf), são respeitadas as distâncias mínimas exigidas pela norma ASTM E 384 (2,5 vezes e meia a diagonal média, se forem consideradas durezas de 250 HV – $d = 0,08\text{mm}$ para 150 HV e $d = 0,06\text{mm}$ para 250 HV)

Para as inspeções em campo ou em fabricação, a norma N 1706 recomenda medições no lado interno dos vasos, com distância máxima do primeiro ponto à zona fundida de 0,5 mm e igual distância desta para a indentação seguinte.

Para o processo Leeb Hardness é recomendada distância mínima entre indentações e destas para as bordas das peças de 3 vezes o diâmetro da indentação (borda a borda) e o processo UCI recomenda 3 vezes a diagonal para aços, cobre e ligas de cobre e 6 vezes para materiais leves.

Em relação à calibração dos equipamentos, as normas Petrobras sobre projeto de vasos de pressão e materiais para vasos de pressão sujeitos a H_2 e H_2S , não permitem a comparação de resultados das medições realizadas com as efetuadas em blocos padrão. A recomendação é de que se tenha como referência um bloco do material a ser medido, cuja dureza tenha sido avaliada por um durômetro de bancada.

As normas referentes aos processos Vickers (ASTM E 92), UCI (ASTM A 1038) e Leeb Hardness (ASTM A 956) permitem a calibração do equipamento através da utilização de blocos padrão. O fabricante do equipamento referente ao processo TIV afirma que este não necessita de calibração.

Em relação à exatidão, segundo as respectivas normas, o processo Vickers apresenta variação de 4% em relação às medições efetuadas em blocos padrão para medições realizadas em condições ótimas. O processo Leeb Hardness tem repetitividade de 4,4%.

Na tabela 6.2 estão mostradas as tolerâncias de medições indicadas pelo fabricante dos equipamentos portáteis utilizados nos experimentos deste trabalho.

Tabela 6.2 – Tolerâncias para medições de dureza através de diferentes métodos [33]

Princípios	Tolerâncias
Leeb	$\pm 5\text{HL}$ da média de 3 a 5 medições realizadas em bloco padrão em relação ao valor especificado no bloco
UCI	$\pm 3,6\%$ da média de 3 a 5 medições realizadas em bloco padrão em relação ao valor especificado no bloco utilizando-se o suporte magnético. Para medições à mão livre os desvios podem ser maiores.
TIV	$\pm 3,6\%$ da média de 3 a 5 medições realizadas em bloco padrão em relação ao valor especificado no bloco.

As normas referentes aos processos que empregam equipamentos portáteis prevêm o emprego destes em diferentes posições. Para o processo UCI a norma ASTM A 1038 informa que pode haver variações nas medições em função da posição para alguns equipamentos (fabricantes) e principalmente para cargas pequenas (abaixo de 10 N).

Para o processo Leeb Hardness, a norma ASTM A 956 informa que equipamentos mais modernos compensam automaticamente as variações nas leituras devidas a variações nas posições de medição. É apresentada na norma uma série de tabelas com fatores de correção para os equipamentos que não apresentam essa função de compensação. Segundo informação do fabricante do equipamento TIV, a medição em posições diferentes da horizontal não deve causar variação nos resultados das medições.

Para a maioria dos processos de medição de dureza há recomendações para cuidados especiais em relação a medições realizadas em peças curvas. A norma ASTM E 92 apresenta tabelas com fatores de correção para diferentes curvaturas. As demais normas não especificam fatores de correção aplicáveis.

Nos catálogos e artigos técnicos encontrados em sites de fabricantes de equipamentos portáteis constam recomendações para a melhor utilização de cada processo de medição. Todos os consultados recomendam a utilização de processos que proporcionam pequenas indentações para medições de dureza em zonas termicamente afetadas de soldas.

A literatura e as normas consultadas fazem recomendações no mesmo sentido quando se referem a processos convencionais. A maioria das recomendações para medições em ZTA's de soldas recai sobre processos como Vickers com cargas baixas, de 5 e 10kgf, que implicam em pequenas indentações.

Em nenhum dos catálogos ou normas consultados há recomendações para a utilização do processos Leeb Hardness para a avaliação de dureza na ZTA. A Figura 6.7 mostra, esquematicamente, impressões realizadas pelos processos Leeb (sonda tipo D - circular) e pelo processo UCI (losangulares) com cargas de 98 N, 50 N e 10 N – esquerda para a direita.

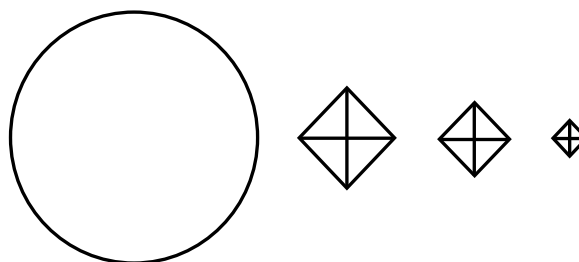


Figura 6.7 - Esquema representativo do tamanho de indentações proporcionadas pelos processos Leeb Hardness (circular) e UCI (losangulares) [31]

Na Figura 6.8 estão mostradas esquematicamente as subzonas constituintes da zona termicamente afetada de soldas. O esquema permite a avaliação da ordem de grandeza da dureza de cada região. À direita pode ser observada a relação de larguras entre a ZTA e a largura da solda.

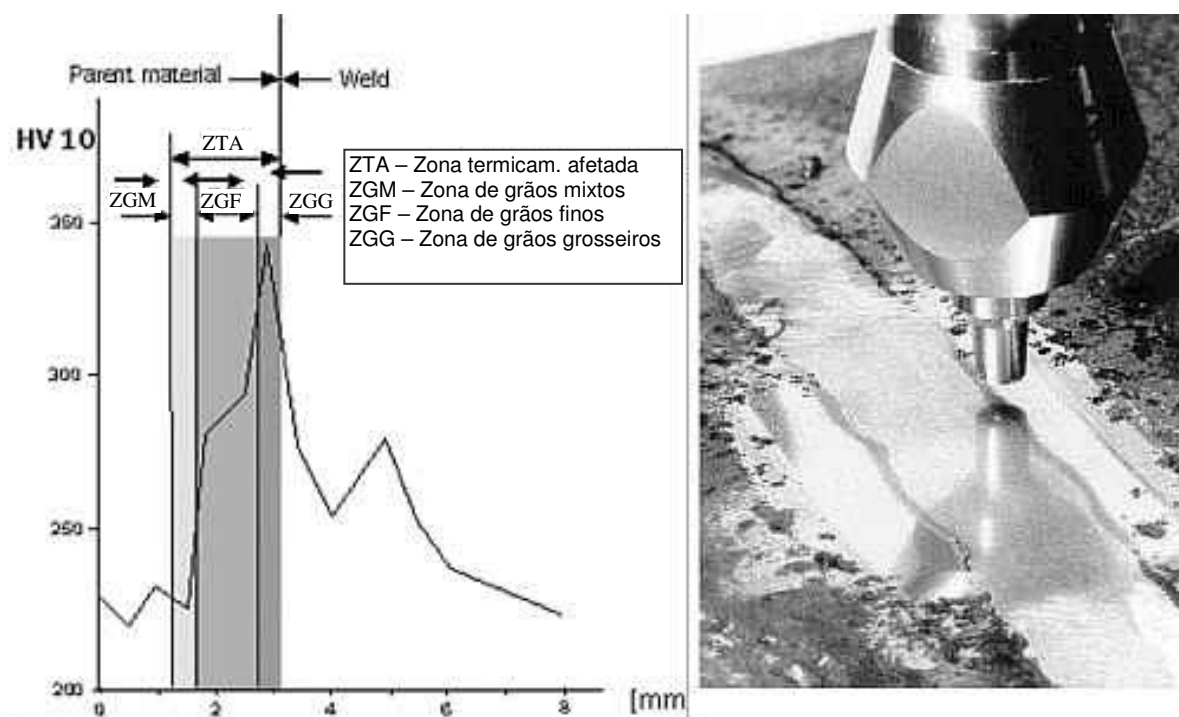


Figura 6.8 – Representação esquemática - dureza nas diferentes regiões da ZTA [31]

A Figura 6.8 mostra que a região que apresenta maior dureza é a zona de grãos grosseiros. Segundo a literatura as dimensões da ZTA dependem de vários fatores, mas é usual para processos e aplicações convencionais adotar-se valores entre 1,5 e 6 mm. Pode-se notar na Figura que a região de maior dureza é a mais estreita. Sendo assim, medições realizadas com processos cujas indentações ultrapassem os limites dessa região podem resultar em leituras com valores menores que os reais.

A Figura 6.9 mostra esquematicamente a ZTA e as impressões obtidas por diferentes processos de medição. O círculo maior representa a indentação realizada por teste tipo Poldi. O teste Poldi consiste no martelamento de uma esfera localizada na extremidade de um dispositivo sobre a peça na qual se deseja avaliar a dureza. O equipamento permite a indentação de uma barra padrão de dureza simultaneamente à realizada na peça. A medida da dureza é determinada em função da diferença de tamanho das indentações da peça e da barra padrão.

Dentre os processos apresentados na Figura, apenas o processo Vickers, com cargas de 5 e 10 kgf, é adequado para a avaliação da dureza na zona de grãos grosseiros. Ambas as indentações ficam totalmente contidas nessa região. A representação da indentação referente ao processo Leeb ultrapassa consideravelmente a região de interesse e a impressão do processo Poldi apresenta dimensões muito maiores que as convencionais da ZTA. A Figura localizada à esquerda mostra o aspecto das indentações realizadas em uma peça.

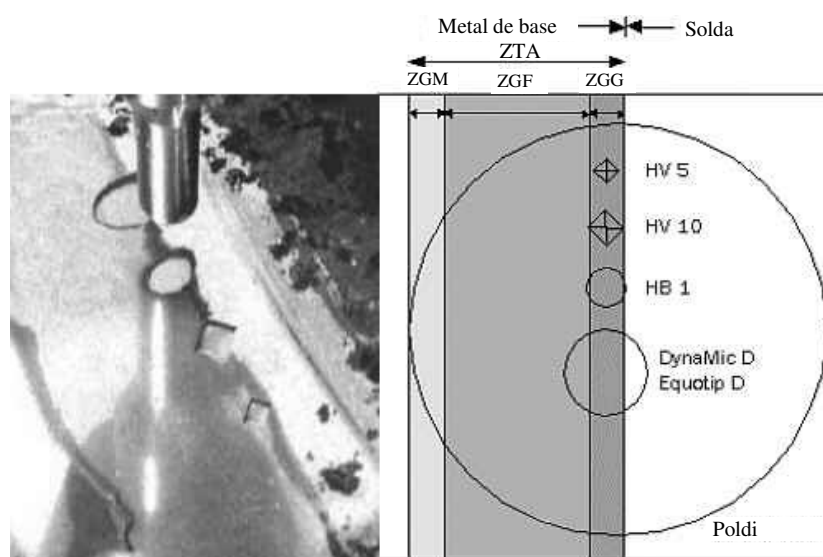


Figura 6.9 – Representação esquemática de indentações realizadas por diferentes processos na zona de grãos grosseiros da ZTA [31]

6.1.3 Análise sobre recomendações e requisitos para equipamentos e dispositivos empregados em ensaios

De forma geral, quando as normas especificam os processos a serem empregados, definem indiretamente o tipo de equipamento associado. As normas relativas a processos específicos referem-se aos equipamentos e dispositivos de forma descritiva. Em geral as exigências e recomendações são relacionadas à integridade, aferição e calibração,

limitações técnicas e aos resultados que os equipamentos podem fornecer. Estes aspectos foram abordados nos itens anteriores, visto que as variáveis de interesse constam em mais de uma planilha.

6.1.4 Análise sobre as recomendações para corpos-de-prova e peças empregados em ensaios

As informações consideradas no levantamento sobre recomendações e requisitos para peças e corpos-de-prova provém principalmente de normas específicas para estes processos.

De forma geral os processos são recomendados para aplicação em materiais metálicos. Entre os processos que têm normas específicas, o de microdureza apresenta recomendações para utilização também em cerâmicas e polímeros. As informações do fabricante do equipamento TIV são de que este pode ser empregado em cerâmicas, vidros e plásticos.

As normas referentes aos processos Leeb Hardness e UCI fazem recomendações quanto à massa mínima das peças a serem avaliadas, sem que haja a necessidade de fixação destas em dispositivos auxiliares com rigidez adequadas.

Para o processo Leeb, as exigências em relação à massa variam em função da sonda a ser empregada para a medição. Para a sonda tipo D, empregada nos experimentos deste trabalho, a massa mínima requerida é de 5 kg. A norma referente ao processo UCI recomenda a fixação em suportes rígidos de peças com massas menores que 300 gramas.

Em ambas as normas, há a advertência de que a não fixação de peças com massa mínima abaixo das recomendadas podem implicar em valores de leitura abaixo dos reais. Entretanto, não são apresentados detalhes sobre a massa e a rigidez exigidas dos dispositivos para a fixação das peças.

A norma relativa ao processo Leeb recomenda para a calibração do equipamento, a utilização de blocos padrão com dimensões de não menores que 90 mm de diâmetro por 54 mm de altura. Para um aço, com massa específica de aproximadamente 7.900 kg/m^3 , a massa de um bloco é de aproximadamente 2,7 kg. A norma JIS B 7731 prevê blocos padrão para sonda tipo D com diâmetro de 115 mm e altura de 33 mm, que possuem os mesmos 2,7 kg. Não há recomendação para fixação dos blocos padrão na calibração dos equipamentos.

A maioria das normas referentes aos processos estudados apresenta recomendações relacionadas à espessura mínima das peças a serem avaliadas. Para o processo

Vickers, a espessura mínima recomendada é de 1,5 vezes a média das diagonais da indentação. De modo geral, a espessura deve ser tal que não permita o aparecimento de marcas no lado oposto ao da indentação.

Para o processo Leeb, a espessura mínima exigida varia de 1 a 5 mm, dependendo do tipo de sonda a ser empregada. Para a sonda tipo D, utilizada neste trabalho, a espessura mínima recomendada é de 3 mm. O fabricante do equipamento TIV informa que não há restrições em relação à massa das peças para este processo.

Para o processo UCI, quando utilizado para a medição de dureza em camadas de recobrimento, a espessura mínima requerida é de 10 vezes a dimensão da diagonal média das indentações. Em medições convencionais, a espessura mínima requerida é entre 2 e 3 mm. A norma adverte que podem ocorrer alterações nos resultados das medições para peças com espessura de parede menores que 15 mm. Informa que em alguns casos, problemas dessa natureza podem ser solucionados com a fixação das peças em suportes rígidos.

A recomendação do fabricante do processo TIV é de que a espessura da peça seja de no mínimo 10 vezes a profundidade da indentação. Para o processo de microdureza, não há recomendações quanto à espessura mínima para as peças.

Todas as normas referentes a processos específicos de medição de dureza fazem exigências em relação à qualidade de superfície necessária às peças. De um modo geral o bom desempenho de todos os processos abordados neste trabalho depende de peças ou corpos-de-prova com boa qualidade de superfície.

A norma relativa ao processo Vickers (ASTM E 92) cita a necessidade de cuidado para que não haja revenimento durante a retificação ou endurecimento durante o polimento. Não há indicação de rugosidade máxima aceitável. Apenas a recomendação de que a preparação da superfície deve ser tal que as diagonais possam ser medidas com precisão de $\pm 0,5 \mu\text{m}$ ou $\pm 0.5 \%$ do seu comprimento - o que for maior. A norma também recomenda que as faces opostas às de medição tenham boas qualidades de superfície ou que os corpos-de-prova devam ser fixados para que não haja deslocamento dos mesmos durante a realização dos testes.

A norma ASTM E 384 recomenda que, para medições com o processo de microdureza Vickers, as superfícies dos corpos-de-prova sejam polidas ou preparadas adequadamente, de modo que fiquem livres de defeitos. Os ataques químicos às superfícies devem ser evitados. Quando necessários devem ser leves. A norma informa que a qualidade da superfície da peça deve ser melhor tanto quanto menor for a carga aplicada no teste.

Para o processo Leeb Hardness, as recomendações são de que qualquer pintura, escama, ou outro recobrimento devem ser completamente removidos da superfície. É recomendável que as superfícies de teste sejam usinadas (ou retificadas) e polidas.

A norma ASTM A 956 apresenta as exigências de rugosidade para as diferentes sondas que podem ser empregadas, associadas ao tamanho dos grãos dos rebolos de retificação a serem empregados. As exigências em termos de rugosidades máximas admissíveis vão de 0,4 a 7 μm (R_a). Para a sonda tipo D, empregada neste trabalho, a exigência é de rugosidade máxima R_a de 2 μm . A norma adverte que superfícies grosseiras tendem a apresentar resultados inferiores aos reais.

A norma ASTM A 1038 08, relativa ao processo UCI, recomenda que superfícies com melhores acabamentos podem ser testadas com cargas menores, enquanto que superfícies grosseiras exigem cargas tão grandes quanto possível. Em qualquer caso, as superfícies devem estar livres de impurezas (óleo, poeira etc) e oxidação.

A rugosidade da superfície (R_a) não deve exceder a 30% da profundidade de penetração (h): ($R_a \leq 0.3 * h$), onde: $h[\text{mm}] = 0.062 * (\text{Carga [N]}/\text{Dureza [HV]})^{1/2}$. As exigências em termos de rugosidade vão de $R_{a \text{ Max}} = 2,5 \mu\text{m}$ para carga de 3 N até 15 μm para carga de 98 N. Nos experimentos realizados neste trabalho, a carga utilizada foi de 50N. Nesse caso a rugosidade máxima exigida é de 10 μm .

A norma recomenda cuidados em relação à preparação da superfície, caso seja necessária. Deve-se evitar alterar a superfície por superaquecimento ou trabalho a frio. Pintura, escamas e quaisquer outros recobrimentos devem ser completamente removidos. Superfícies inadequadas podem causar leituras instáveis. Acabamentos grosseiros tendem a apresentar resultados menores que os reais.

6.2 - Experimentos

Foram realizados pré-testes com todos os equipamentos utilizados neste trabalho. Os objetivos principais foram o treinamento na operação, a pré-avaliação de alguns aspectos relativos aos experimentos e a detecção de oportunidade de aprimoramentos no planejamento dos mesmos.

Um dos aspectos considerados foi a comparação de resultados de medições realizadas com o emprego do processo Leeb Hardness. Foram comparados resultados de medições com corpos-de-prova não fixados e fixados em um suporte rígido.

Os corpos-de-prova obtidos da junta soldada têm massa aproximada de 1,4 kg. Segundo discussão apresentada no item 4.1.4, a norma ASTM A 956 - 06, relativa ao

processo Leeb Hardness, recomenda a fixação de peças a serem medidas com massa menor que 5 kg. Entretanto, os blocos padrão normatizados para a aplicação da sonda tipo D, têm massa aproximada de 2,7 kg.

Os resultados dos pré testes mostraram que não houve variação significativa nos valores medidos, ou seja, a ordem de desvio em relação ao processo de referência foi a mesma com ou sem fixação. Também não houve leituras com valores inferiores para o processo Leeb Hardness, comparadas às obtidas pelo processo Vickers HV5 (bancada).

Com base nestes resultados, optou-se por realizar as medições na posição horizontal para todos os aparelhos sem a fixação dos corpos-de-prova, tendo-se assim condições idênticas para todos os corpos-de-prova em todas as situações.

6.2.1 Avaliação comparativa do desempenho de equipamentos e processos em relação à exatidão e repetitividade

A Figura 6.10 mostra o desempenho dos diferentes aparelhos na medição de dureza nas medições realizadas com os corpos-de-prova de metal de base, obtidos a partir das juntas soldadas. Todas as medições referentes a este experimento foram realizadas com as faces dos corpos-de-prova na posição horizontal – posição convencional para medição em durômetros de bancada.

Os resultados apresentados são as médias obtidas das medições de três corpos-de-prova, onde foram realizadas medições para todos os processos. Em cada corpo de prova foram realizadas 6 medições para os processos Vickers (referência) e Microdureza e dez medições para os demais. Os valores das medições dos processos que empregam equipamentos portáteis foram automaticamente transformados para a escala Vickers, segundo a norma ASTM E 140 - 07.

Por meio da análise do gráfico apresentado na Figura 6.10 percebe-se que todos os processos empregados para comparação com o processo Vickers apresentam valores médios superiores a este. Os processos que utilizam equipamentos portáteis apresentaram médias mais próximas à obtida pelo processo-referência do que o processo de microdureza.

Enquanto a maior diferença destes para a referência foi de 3,41% (processo TIV), a diferença da média obtida pelo processo de microdureza é de 8,86% (Tabela 6.2). O processo UCI foi o que apresentou média mais próxima da referência, com diferença de 0,31%. A diferença apresentada pelo processo Leeb Hardness foi de 3,33%.

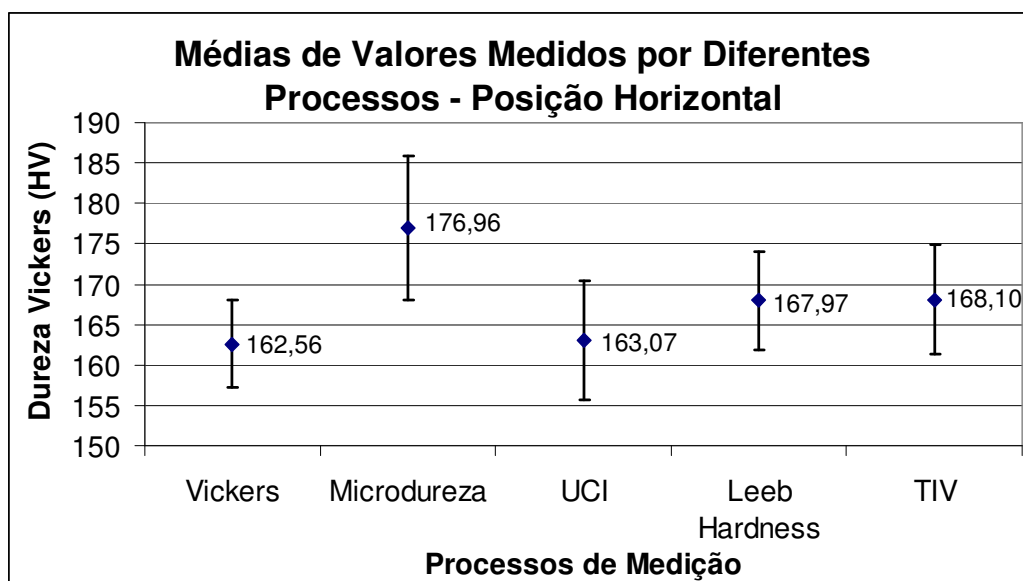


Figura 6.10 – Médias de valores medidos por diferentes processos – corpos-de-prova da junta soldada - posição horizontal

Em relação à dispersão das medições, todos apresentaram valores maiores que a referência, que foi de 3,35% (Tabela 6.3). O processo de microdureza foi o que apresentou pior desempenho, com desvio padrão de 5,09%. Os processos que utilizam equipamentos portáteis tiveram todos desvios padrão menores que 5 %, sendo que o de melhor desempenho foi o processo Leeb Hardness.

Tabela 6.3 – Desvios das médias e desvios padrão de vários processos em relação ao processo Vickers – corpos-de-prova da junta soldada (metal de base) - posição horizontal

Processo	Média (HV)	Desvio da médias em relação à referência		Dispersões das medições	
		Desvio (HV)	Desvio (%)	Desvio padrão (HV)	Desvio padrão (%)
Vickers	162,56	0	0,00%	5,43	3,35%
Microdureza	176,96	14,40	8,86%	9,00	5,09%
UCI	163,07	0,51	0,31%	7,36	4,52%
Leeb Hardness	167,97	5,41	3,33%	6,04	3,53%
TIV	168,10	5,54	3,41%	6,71	3,99%

Os resultados das medições realizadas nas barras padrão para testes tipo Poldi estão mostrados na Figura 6.11 e na Tabela 6.4. A barra utilizada no trabalho tem a dureza especificada de 250 HB, ou seja, aproximadamente 263 HV, segundo ASTM E 140 – 07.

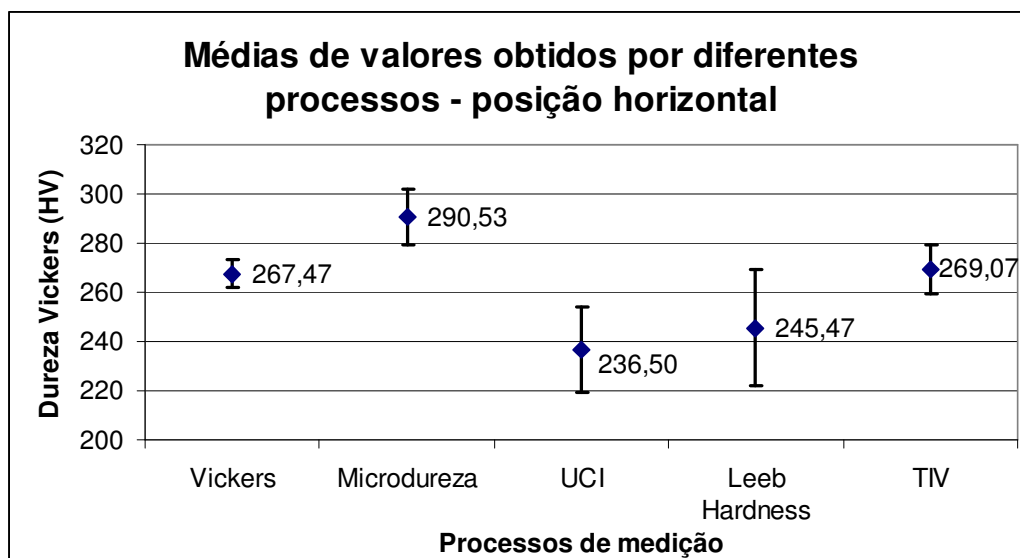


Figura 6.11 – Médias de valores medidos por diferentes processos – barras padrão para Poldi - posição horizontal

Pela análise do gráfico apresentado na Figura 6.11 percebe-se que a maior parte dos processos de medição apresentou desempenhos diferentes em relação aos apresentados nas medições realizadas nos corpos-de-prova da junta soldada.

O processo de microdureza apresentou diferença da média das medições em relação ao processo Vickers de ordem similar ao anterior, novamente com valor acima do valor medido pelo processo-referência. A diferença percentual foi levemente menor para este teste: 8,62% contra 8,86 % para o teste anterior.

O processo UCI foi o que apresentou maior diferença: 11,58% em relação à média, o que significa aproximadamente 31 pontos na escala Vickers para a ordem de grandeza da dureza medida. No mesmo ensaio realizado com corpos-de-prova de menor dureza este processo foi o que apresentou o melhor desempenho (diferença de 0,31%).

O processo Leeb Hardness também teve desempenho inferior: diferença de 8,33% para este teste contra 3,33 % para o anterior. O processo TIV foi o que apresentou melhor desempenho na avaliação das barras de Poldi. A diferença em relação a media obtida pelo processo Vickers foi de 0,60%, enquanto que para o teste anterior foi de 3,41%.

Em relação à dispersão dos resultados, houve melhora de aproximadamente 1% para os processos de bancada (Vickers e Microdureza) e uma leve melhora para o processo TIV. Os processos Leeb Hardness e UCI tiveram desempenhos bastante inferiores aos obtidos nos testes realizados com corpos-de-prova da junta soldada.

Tabela 6.4 – Desvios das médias e desvios padrão de vários processos em relação ao processo Vickers – barras para teste Poldi - posição horizontal

Processo	Média (HV)	Desvio das médias em relação à referência		Dispersões das medições	
		Desvio (HV)	Desvio (%)	Desvio padrão (HV)	Desvio padrão (%)
Vickers	267,47	0	0,00%	5,62	2,10%
Microdureza	290,53	23,07	8,62%	11,41	3,93%
UCI	236,50	-30,97	-11,58%	17,36	7,34%
Leeb Hardness	245,47	-22,00	-8,23%	23,63	9,63%
TIV	269,07	1,60	0,60%	10,03	3,73%

Os processos que tiveram piora no desempenho são aqueles cujas normas apresentam restrições relativas à massa mínima. As normas fazem advertências quanto à possibilidade de as medições realizadas sem fixação das peças com massas menores que as mínimas recomendadas apresentarem valores inferiores aos reais.

Dessa forma, a provável causa para o desempenho inferior é o fato de o corpo de prova (barra Poldi) ter massa pequena - de aproximadamente 300 g. Esse valor é o mínimo recomendado para medição sem fixação para o processo UCI e bastante inferior ao mínimo recomendado para o processo Leeb Hardness, que é de 5 kg.

6.2.2 Avaliação do desempenho de durômetros portáteis em relação à posição de medição

O gráfico apresentado na Figura 6.12 mostra os resultados referentes aos experimentos realizados para a avaliação do desempenho dos processos em relação à variação das posições de medição.

Para cada posição foram utilizados três corpos-de-prova. Em cada um deles foram realizadas medições para todos os processos, sendo 6 medições para os processos Vickers e dez para os demais (vickers e microdureza – somente na horizontal). Os resultados apresentados referem-se às médias das medições realizadas nos três corpos-de-prova utilizados para cada posição.

Os resultados referentes aos processos Vickers em todos os corpos-de-prova provém de testes realizados na posição horizontal (0°). Os resultados obtidos para a posição indicada como 0°, são os mesmos relatados no item 6.2.1.

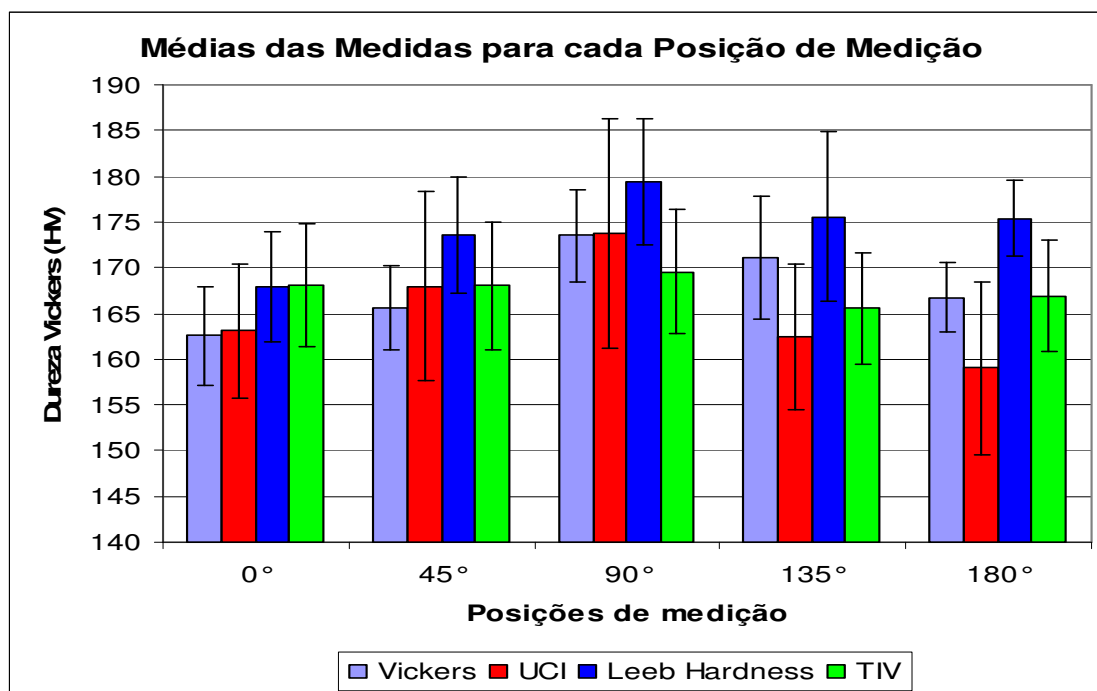


Figura 6.12– Médias de valores medidos por diferentes processos para diferentes posições de medição – corpos-de-prova da junta soldada

O gráfico apresentado na Figura 6.12 mostra que a média da dureza da maioria dos corpos-de-prova medidos pelo processo de Leeb Hardness foi mais alta que as medidas pelos demais processos. Também pode ser observado que o processo TIV apresenta as menores variações para diferentes posições e que o processo UCI apresenta valores menores que a média para as posições de 135 e 180 graus.

Através da análise do gráfico percebe-se que as medições realizadas nos corpos-de-prova empregados para as avaliações a 90° apresentaram valores médios maiores que as demais posições para todos os processos utilizados.

Em primeira análise, esse fato indica a falta de homogeneidade do material, visto que estes corpos-de-prova foram medidos na posição horizontal pelo processo Vickers e os resultados deste indicam uma média também maior que para os corpos-de-prova utilizados para outras posições de medição.

A influência das posições de medição nos resultados requer uma análise mais cuidadosa e pode ser melhor avaliada através dos dados das tabelas e gráficos apresentados a seguir.

Na Tabela 6.5 são mostrados os resultados das médias medidas para cada processo, para cada posição de medição e as diferenças das médias dos processos que empregam equipamentos portáteis em relação ao processo-referência.

Tabela 6.5 – Médias das medições de diferentes processos para diferentes posições – cor-de-prova da junta soldada

Processo	Posições de medição					Médias por Processo	Diferenças em relação à referência
	0°	45°	90°	135°	180°		
Vickers	162,56	165,61	173,50	171,11	166,73	167,90	0,0%
UCI	163,07	167,97	173,80	162,43	159,03	165,26	-1,57%
Leeb Hardness	167,97	173,53	179,40	175,60	175,37	174,37	3,85%
TIV	168,10	168,03	169,57	165,53	166,93	167,63	-0,16
Médias por posição p/ equip. portáteis	166,38	169,84	174,26	167,86	167,11		
Diferenças em relação à referência	2,35%	2,56%	0,44%	-1,9%	0,23%		
Faixas de dispersão entre equip. portáteis (HV)	5,03	5,56	9,83	13,17	16,34		

A análise da Tabela 6.5 permite uma visão geral dos desempenhos dos diferentes processos. Pode-se notar que, considerando-se todas as posições de medição, a maior diferença em relação à referência foi apresentada pelo processo Leeb Hardness (3,85%). O melhor desempenho foi do processo TIV, com diferença de -0,16%.

As duas últimas linhas da tabela mostram a média obtida para os três equipamentos portáteis para cada posição de medição em relação ao processo Vickers. As posições cujas diferenças foram maiores são as de 0, 45 e 135 graus. As médias das posições de 90 e 180 graus apresentaram diferenças menores que 0,5%.

Entretanto, deve ser observado que para essas duas posições não se têm as menores diferenças de resultados entre os processos UCI, Leeb Hardness e TIV. A posição cuja média das medições destes aparelhos apresentou a menor diferença em relação à média de referência é a que apresenta maior diferença neste aspecto. O aumento nos valores absolutos da faixa de dispersão se deve principalmente à queda dos valores medidos através do processo UCI para as posições de 135 e 180°.

A Tabela 4.6 mostra os desvios padrão em percentagem das medidas obtidas com o processo referência na posição horizontal e com os processos de medição portáteis. Mostra também as diferenças de cada um dos três processos para cada posição de medição em relação à referência. Esta tabela permite a análise detalhada dos resultados obtidos para cada

processo em cada posição. Os valores mínimos e máximos estão marcados em negrito, sendo que os mínimos como *italico* e os máximos sublinhados.

Tabela 6.6 – Diferenças das médias e desvios padrão dos processos UCI, Leeb e TIV em relação ao processo Vickers para diferentes posições

Processo	Posições de medição					Médias por Processo	Diferenças em relação à referência
	0°	45°	90°	135°	180°		
Vickers	162,56	165,61	173,50	171,11	166,73	167,90	0,0%
Desvio Padrão (%)	3,35	2,75	2,83	<u>3,91</u>	<u>2,31</u>		
UCI	163,07	167,97	173,80	162,43	159,03	165,26	-1,57%
Dif. Média (%)	0,31	1,42	<u>0,17</u>	<u>-5,07</u>	-4,62		
Desvio Padrão (%)	<u>4,52</u>	6,15	<u>7,08</u>	4,85	5,88		
Leeb Hardness	167,97	173,53	179,40	175,60	175,37	174,37	3,85%
Dif. Média (%)	3,33	4,78	3,40	<u>2,62</u>	<u>5,18</u>		
Desvio Padrão (%)	3,53	3,64	3,85	<u>5,30</u>	<u>2,37</u>		
TIV	168,10	168,03	169,57	165,53	166,93	167,63	-0,16
Dif. Média (%)	<u>3,41</u>	1,46	-2,27	-3,26	<u>0,12</u>		
Desvio Padrão (%)	3,99	<u>4,16</u>	4,00	3,65	<u>3,64</u>		

A análise da Tabela 4.6 mostra que nenhuma tendência clara de melhora ou piora de desempenho pode ser observada para diferentes processos em diferentes posições de medição. Merece destaque o fato de que o processo Leeb Hardness coincide com o Vickers nas posições onde foram detectados o maior e menor desvios padrão: 135° e 180°, respectivamente. As medições realizadas a 180° apresentam mínimo desvio padrão para três processos: Vickers, Leeb Hardness e TIV.

A ordem de grandeza das diferenças máximas das medições em relação às médias da referência ficou em torno de 5%. Os desvios padrão máximos também ficaram nessa ordem, com exceção do processo UCI, que apresentou desvio padrão máximo de 7,08%. Este processo também foi o único que apresentou médias das medições maiores que as da referência para todas as posições. Os gráficos mostrados nas Figuras 6.13 e 6.14 ilustram os dados apresentados na Tabela 4.6.

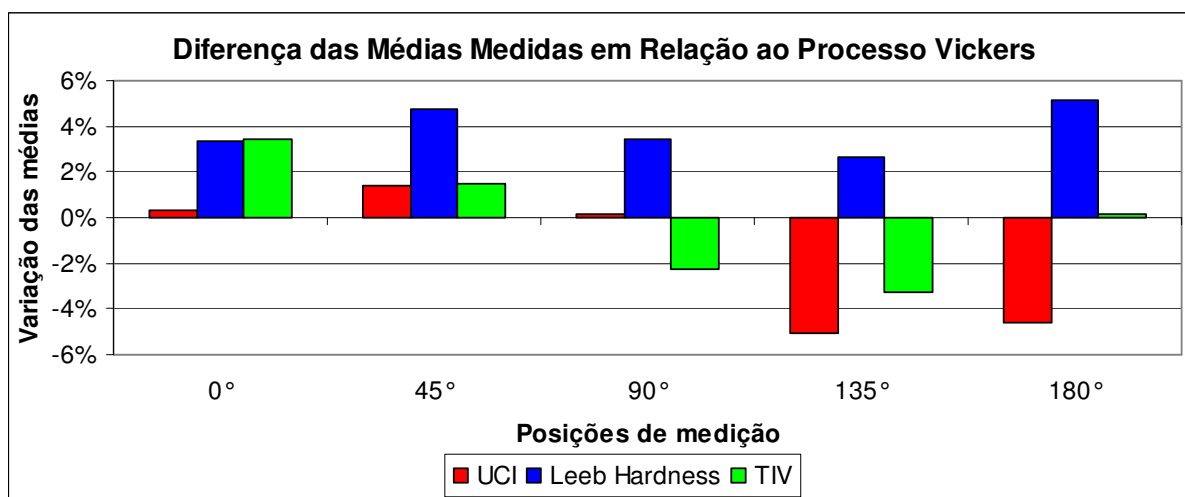


Figura 6.13 – Diferenças das médias de medidas por diferentes processos em relação às medidas pelo processo Vickers.

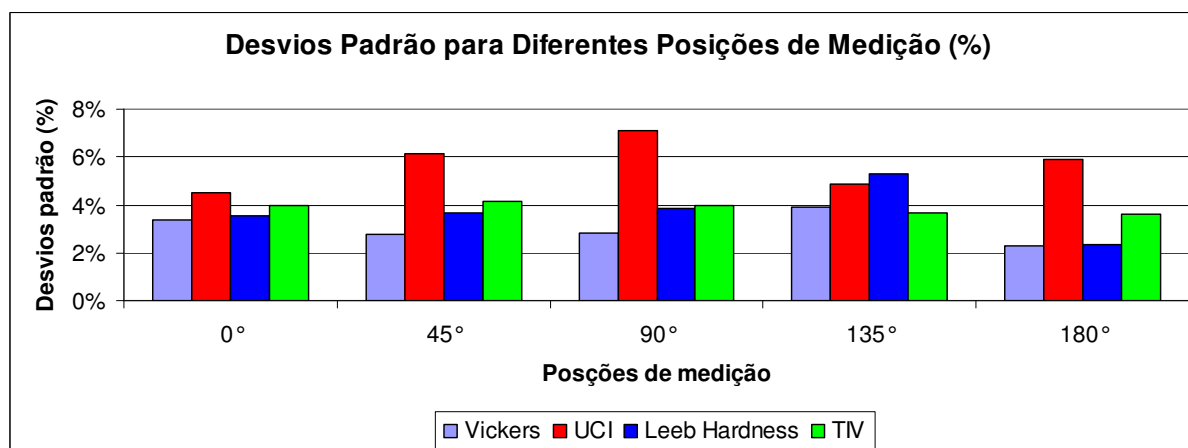


Figura 6.14 – Desvios padrão para diferentes posições de medição

6.2.3 Avaliação do desempenho de durômetros portáteis em relação à medição de dureza na zona termicamente afetada de soldas

Os processos recomendados pelas normas Petrobras para qualificação de procedimentos de soldagem são o Vickers e o de Microdureza. Ambos empregam durômetros de bancada, o que facilita o posicionamento das indentações segundo as recomendações da norma N 133.

As medições tanto nas faces laterais quanto nas externas e internas com o emprego destes processos foram realizadas segundo as recomendações desta norma, a menos da distância mínima das indentações à borda do corpo de prova, que foi de 1,5 mm.

Para os processos que empregam equipamentos portáteis, as distâncias das indentações às bordas das peças foram sempre maiores que 5 mm. Para estes processos há

certa dificuldade de posicionamento das indentações em linha e no sentido transversal à solda. Os principais motivos são, em alguns casos, a dificuldade de visualização clara da ZTA e as dimensões reduzidas da mesma.

Para estes processos procurou-se seguir as recomendações da norma NACE MR 0175 2003 / ISO 15156 -1, que recomenda indentações em linha, no sentido longitudinal da ZTA e tão próximas quanto possível da Zona Fundida.

Mesmo assim ainda foi encontrada dificuldade de posicionamento das sondas, pois a ZTA dos corpos-de-prova medidos tem dimensão entre 2 e 3 mm. Para todos os equipamentos portáteis foi necessária a verificação do posicionamento de cada indentação após a medição para garantia de que estas estavam localizadas em posições adequadas, segundo as recomendações das normas.

Para o processo Leeb Hardness o posicionamento da sonda no local correto é especialmente difícil, visto que a base de apoio encobre a região onde será realizada a indentação (Figura 6.15). O fabricante do equipamento não recomenda a utilização do mesmo para a medição de dureza em zonas termicamente afetadas de soldas.



Figura 6.15 – Sondas utilizadas para medições através do processo Leeb Hardness [33].

A avaliação de desempenho em relação aos valores medidos é dificultada em função de alguns fatores. Entre eles está a impossibilidade de execução das indentações segundo o mesmo critério para todos os processos.

Teoricamente, a região de maior dureza da ZTA é a mais próxima da zona fundida. Medindo-se da forma como está indicado na norma N 133, há maior probabilidade de os valores das medições sejam decrescentes à medida que as indentações sejam feitas em pontos mais distantes dessa região. A probabilidade de se encontrar pontos mais duros segundo as recomendações da norma NACE é maior. Essas dificuldades tornam a avaliação subjetiva neste aspecto específico de valores medidos por cada processo.

Para estes experimentos foram utilizados dois corpos-de-prova iguais, conforme Figura 6.16. Foram realizadas medições com todos os processos empregados neste trabalho nas faces laterais (seções transversais das soldas) e nas faces superior e inferior (partes externas das soldas).



Figura 6.16 – Corpo-de-prova utilizado para medições de dureza nas regiões de soldas

Os gráficos mostrados nas Figuras 6.17 e 6.18 mostram os resultados medidos através de cada processo empregado nos ensaios, comparados aos medidos pelo processo Vickers. Nessas Figuras constam os gráficos que ilustram o desempenho de cada equipamento. Para os processos Vickers HV5 e o processo de microdureza, as indentações foram realizadas transversalmente ao cordão de solda (segundo recomendação da norma N133). Para os processos que utilizam equipamentos portáteis, as medições na ZTA foram realizadas na direção paralela à linha de fusão da solda.

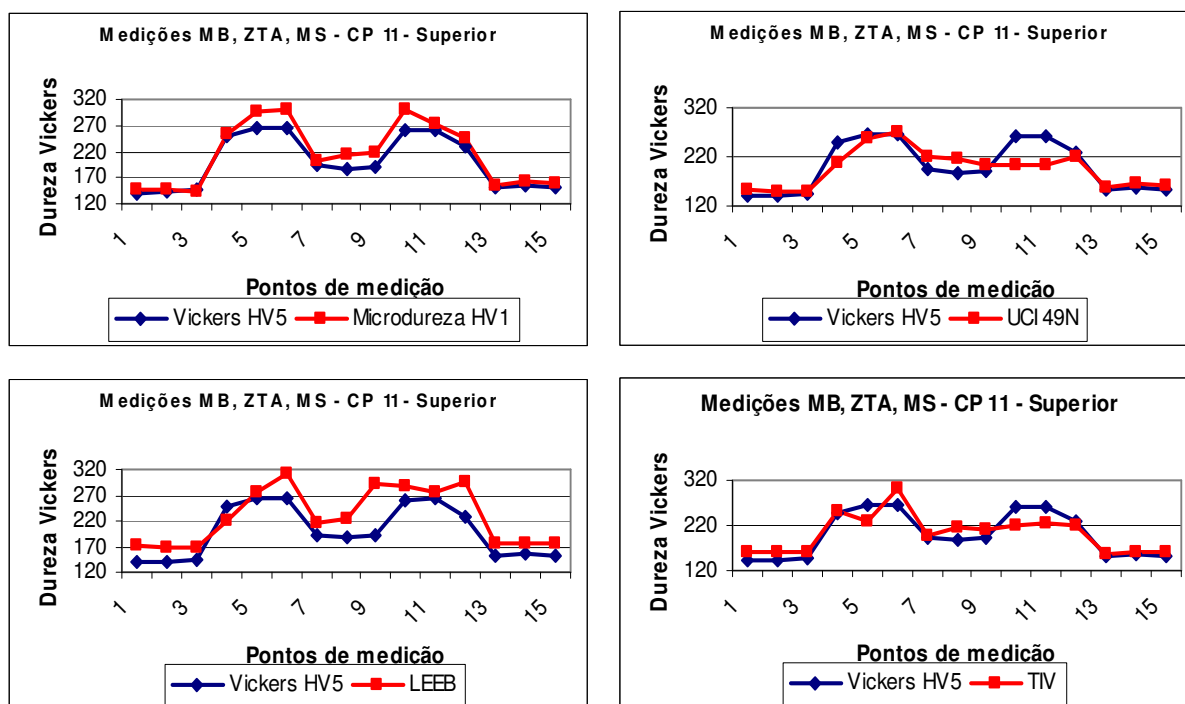


Figura 6.17 – Medições realizadas na face superior do corpo de prova

A Figura 6.17 é relativa a medições realizadas na face superior do corpo de prova – simulando a condição de medição em campo. A Figura 6.18 é referente a medições realizadas na face lateral dos corpos-de-prova - simulando as medições realizadas em qualificações de procedimentos de soldagem.

Foi observado através da realização dos ensaios que o comportamento do processo de microdureza é o que mais se aproxima do processo de referência. Isto se deve à adoção do mesmo critério para o posicionamento das indentações pelo fato de ambos os processos utilizarem equipamentos de bancada. Outro ponto observado foi que a definição da ZTA é mais clara na seção transversal da solda, o que facilitou o posicionamento das indentações de todos os processos.

De forma geral, em relação aos valores de dureza medidos na ZTA pelos diferentes processos, pode-se afirmar que nenhum processo teve desempenho diferenciado dos demais, positiva ou negativamente.

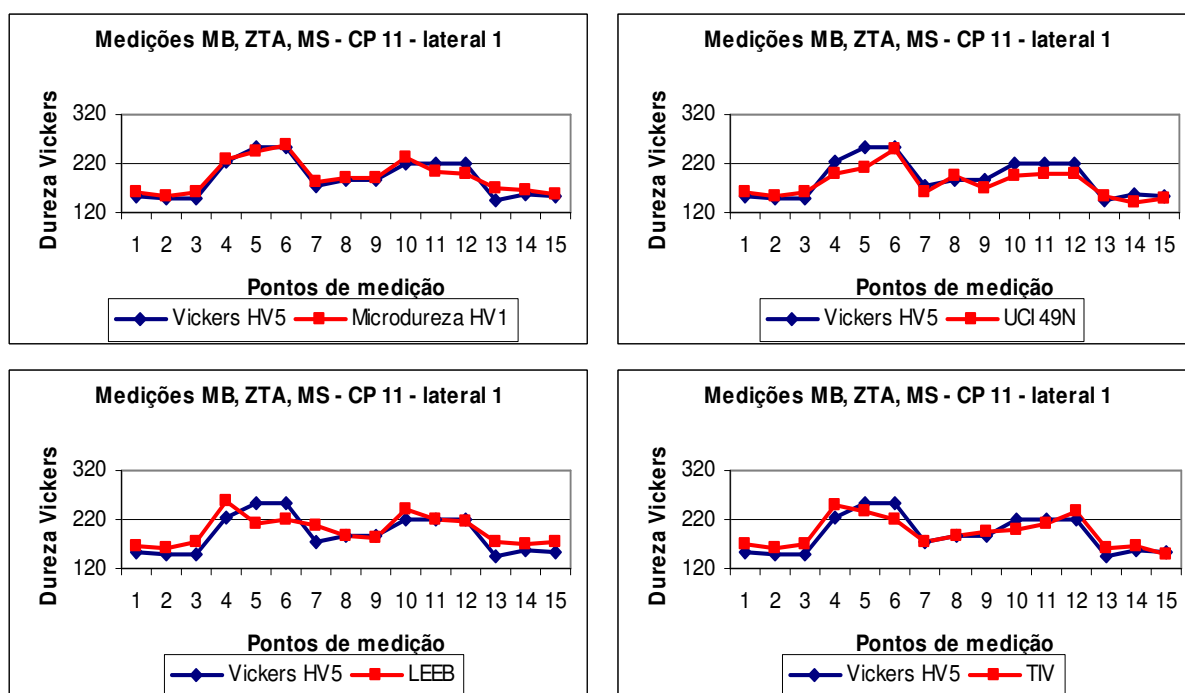


Figura 6.18 – Medições realizadas na face lateral do corpo de prova

Um dos aspectos importantes para a avaliação da adequação dos processos de medição de dureza nas regiões de solda é a dimensão das indentações produzidas pelas medições.

Na Tabela 6.7 são apresentados alguns valores de diagonais médias medidos nos experimentos realizados para diferentes processos. Os valores apresentados nas colunas da esquerda referem-se à região de metal de base e os das colunas da direita à ZTA. Pode-se notar que os valores de dureza são diferentes para um mesmo processo e para diferentes processos. Para permitir uma noção de ordem de grandeza das dimensões, os valores são apresentados com arredondamento de 0,05 mm.

Através da análise da Tabela 4.7 percebe-se que, para as faixas de dureza testadas, os processos mais sensíveis às variações de dureza em relação ao tamanho da diagonal são o Vickers, Leeb Hardness e TIV.

Percebe-se também que, para dureza na faixa de 150 HV, os processos UCI e TIV apresentam tamanhos de indentações próximos. Como a dureza da zona termicamente afetada não é constante, os valores medidos nessa região apresentam faixas maiores de dispersão.

Para durezas na faixa de aproximadamente 220 a 240 HV, o processo TIV apresenta diagonais em uma faixa intermediária entre as obtidas pelos os processos de microdureza e Vickers. Para o processo de microdureza, a ordem de grandeza das medidas,

com o critério de arredondamento empregado, não é alterada com a variação de dureza nas faixas testadas. O processo Leeb Hardness foi o que apresentou as maiores indentações.

Tabela 6.7 – Valores aproximados de diagonais medidas nos experimentos

	HV	d med (mm)	HV	d med (mm)
Vickers HV 5	153	0,25	222	0,20
	150	0,25	219	0,20
	142	0,25	220	0,20
Microdureza HV 1	183	0,10	231	0,10
	173	0,10	263	0,10
	175	0,10	292	0,10
UCI 50N	142	0,20	266	0,20
	136	0,20	265	0,20
	133	0,20	275	0,20
Leeb D	149	0,60	254	0,50
	140	0,60	267	0,50
	138	0,60	239	0,50
TIV 50N	149	0,20	234	0,15
	153	0,20	237	0,15
	157	0,20	215	0,15

Os valores medidos nos experimentos são próximos aos teóricos para o processo Vickers. Aplicando-se a fórmula apresentada na norma ASTM E 92 – 03 para os processos UCI, microdureza e TIV (que utilizam o mesmo indentador e a mesma carga) verificou-se que para o processo TIV a diferença apresentada é da ordem de 30 HV para valores próximos a 150 HV e de 40 HV para a valores próximos a 230 HV. Para os processos de Microdureza e UCI, os valores medidos foram bastante próximos aos teóricos - menores que 1HV para Microdureza e menores que 5 HV para UCI.

A Tabela 6.8 mostra as distâncias mínimas recomendadas entre indentações e destas às bordas das peças para os processos empregados nos experimentos deste trabalho.

Tabela 6.8 – Distâncias mínimas recomendadas para indentações segundo normas.

	Vickers HV5	Micro dureza HV 1	UCI 50N	Leeb D	TIV 50N
Distâncias mínimas entre indentações e destas às bordas das peças (recomendações das normas)	2,5*d centro/borda	2,5*d centro/borda	3*d centro/borda	3*d borda/borda	-

Como os valores medidos nos experimentos são na sua maioria menores que os teóricos, pela segurança é recomendável a utilização dos valores teóricos, quando possível, para estimar as distâncias mínimas recomendáveis para indentações das bordas das peças e entre indentações (Tabela 6.9). As recomendações apresentadas para todos os processos que empregam o princípio Vickers utilizam os valores teóricos das diagonais deste como referência.

Tabela 6.9 – Estimativa para distâncias mínimas recomendadas para indentações.

	Faixas de dureza	Vickers HV5	Micro dureza HV 1	UCI 50N	Leeb D*	TIV 50N
Indentação / borda da peça e Indentação / indentação (mm)	150 HV	0,62	0,62	0,62	1,8	0,62
	250 HV	0,48	0,48	0,48	1,5	0,48

* Utilizado o valor medido nos ensaios para o cálculo das distâncias

Deve ser observado que para o processo Leeb Hardness, a determinação das distâncias mínimas é entre bordas e para os demais entre borda e centro das indentações.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Considerações sobre os resultados relativos aos principais aspectos abordados no trabalho

A proposta inicial deste trabalho foi de que o estabelecimento de critérios para aceitação de medições de dureza realizadas com equipamentos portáteis seja baseado em três aspectos principais (conforme item 5.1):

1. Estabelecer requisitos e recomendações que, na medida do possível, não apresentem conflitos com requisitos e recomendações de normas Petrobras e normas externas vigentes na companhia;
2. Adequação dos processos de medição em relação à aplicação em diferentes regiões das peças, corpos-de-prova e equipamentos (metal base, ZTA e zona fundida de regiões soldadas);
3. Avaliação de características técnicas e de desempenho para diferentes equipamentos e princípios de medição.

A seguir são apresentadas considerações sobre os pontos mais relevantes observados ao longo da realização do trabalho em relação aos aspectos descritos acima.

A maioria dos textos encontrados sobre o assunto com enfoque similar ao deste trabalho está em artigos de fabricantes de equipamentos, em normas e códigos de projeto. Os primeiros no sentido de otimizar a utilização dos equipamentos que fabricam e os últimos na regulamentação dos procedimentos e requisitos técnicos. Os textos encontrados na literatura são, de modo geral, similares aos das normas.

A seleção das normas e códigos de projeto, utilizadas como fontes para a compilação e avaliação das informações, foi realizada em função da aplicação dos mesmos na rotina de trabalho da companhia. Buscou-se através dessa seleção, uma quantidade representativa de fontes, de modo que o levantamento e a organização das mesmas pudesse trazer informações importantes no sentido de auxiliar satisfatoriamente no alcance dos objetivos propostos.

De modo geral as informações são coerentes e complementares. Entretanto, foram encontrados alguns pontos cujas recomendações de diferentes fontes para aspectos semelhantes apresentam variações e, em alguns casos, até conflitos.

Em relação a critérios de aprovação para durezas em equipamentos sujeitos a H_2 e H_2S , verificou-se que as normas Petrobras são mais conservativas que a norma internacional que é referência para a indústria do petróleo (NACE MR0175 - ISO 15156-2001). Esse fato pesa positivamente no sentido de aceitação de medições realizadas em campo.

Os catálogos de fabricantes e as normas consultadas, quando se referem à precisão dos equipamentos, fazem algumas advertências. De modo geral, as observações são no sentido de que medições realizadas em materiais não homogêneos e, no caso dos equipamentos portáteis, sem apoio de dispositivos de fixação das sondas, podem ter a dispersão de resultados aumentada. Essas duas situações são típicas na aplicação prática em inspeções de fabricação e de campo.

Os resultados dos experimentos realizados confirmam as observações das normas. Para todos os experimentos, os equipamentos portáteis apresentaram maiores desvios padrão que os de bancada.

Mas os aspectos para os quais foram encontradas maiores diferenças de recomendações foram o posicionamento, número e distância entre indentações e destas para as bordas das peças. Verificou-se que algumas normas e códigos de projeto abordam de modo diverso esses aspectos.

Enquanto algumas fontes consultadas recomendam o posicionamento das indentações distribuídas pela região de análise, incluindo metal de base, metal de solda e ZTA, outras recomendam indentações em linha, no sentido transversal à solda. Algumas especificam distâncias entre indentações e destas a determinadas regiões. Outras remetem essas questões às normas específicas dos processos de medições de dureza empregados.

As normas Petrobras recomendam indentações em linha e estabelecem distanciamento destas às bordas e da zona fundida. O código ASME recomenda medições em linha e distâncias mínimas entre indentações, mas ressalta que estas podem ser feitas em ângulos se for necessário para que as distâncias mínimas sejam respeitadas. A norma NACE recomenda posições distribuídas das indentações na ZTA, tão próximas quanto possível da zona fundida.

É sabido que a zona de maior dureza das soldas é a região mais próxima da zona fundida, conhecida como zona de granulação grosseira. Sendo assim, se o objetivo da medição é avaliar o perfil de dureza da ZTA, as indentações em linha são mais adequadas.

Se, no entanto, o objetivo das medições é a detecção da dureza máxima de uma determinada região da peça a ser avaliada, a recomendação de vários pontos ao longo do

cordão ou do perfil, tão próximos quanto possível da zona fundida é mais adequada. Nos casos de medições de dureza com equipamentos portáteis essa segunda hipótese se enquadra melhor.

O distanciamento mínimo entre as indentações deve respeitar as normas específicas relativas a cada princípio de medição utilizado. Em relação a esse aspecto, deve ser levada em consideração também a largura da ZTA, que depende de vários fatores como ao material e dimensões das peças, processo de soldagem e parâmetros utilizados.

Outra questão relevante sobre a medição de dureza na ZTA é a aplicação de determinados processos para essa função. A maioria das fontes consultadas recomenda a aplicação do processo Vickers com cargas baixas (5 e 10 kgf), o que proporciona indentações pequenas o suficiente para detecção da dureza na zona de granulação grosseira.

O processo de microdureza também atende aos requisitos em relação a este aspecto. A norma Petrobras N1706 recomenda este processo para a qualificação do procedimento de soldagem. Entretanto, na prática, há controvérsias a respeito da aplicação desse processo. As versões mais antigas da norma NACE MR 0175 não recomendam a utilização deste processo. A versão mais recente alerta que este processo pode ser empregado com alguns cuidados. A norma ISO 9015-2 prevê e regulamenta a avaliação de regiões de solda com a utilização deste processo.

Essa norma não foi considerada na fase de levantamento de dados por não ser citada nas normas usualmente empregadas na companhia. A recomendação de posicionamento e de distâncias dessa norma referentes as indentações é diferente das recomendadas pela norma Petrobras.

Os ensaios realizados com o processo de microdureza neste trabalho não possibilitaram a avaliação de forma adequada da validade ou não da utilização desse processo para medições de dureza na ZTA de soldas.

O levantamento de dados evidenciou o fato de que o princípio do rebote não é adequado para a realização de testes de dureza em zonas termicamente afetadas de soldas. Os experimentos realizados com equipamento que emprega o processo Leeb Hardness reforçaram essa constatação.

Em nenhuma fonte consultada foi encontrada recomendação da utilização deste princípio de medição para esse fim, havendo inclusive indicações do fabricante de que é não recomendável. A argumentação encontrada em artigos técnicos de fabricantes é baseada no fato de que as indentações são tipicamente maiores que as dimensões da zona de grãos grosseiros da ZTA, que é a região crítica de avaliação. Sendo assim, esses equipamentos

podem apresentar medições com valores menores que os máximos apresentados em determinados pontos.

A avaliação do desempenho referente a repetitividade e exatidão de diferentes processos de medição mostrou que as diferenças em relação ao processo de referência (Vickers HV5) são pequenas para os equipamentos portáteis: diferença máxima em relação ao desvio padrão de 1,17% (UCI) e de 3,33% (Leeb Hardness) em relação à exatidão.

Os resultados obtidos pela aplicação do processo de microdureza apresentaram desvios maiores: 1,74% de diferença para o desvio padrão e 8,86% em relação à exatidão. Para todas as medições realizadas fora da ZTA, os resultados apresentados por esse processo foram maiores que para os demais. Entretanto, na calibração com blocos padrão, os resultados foram satisfatórios. Uma explicação provável para essa diferença é a qualidade da superfície dos corpos-de-prova utilizados, que não era de superfície polida.

Para os testes realizados na barra, foram percebidas piores no desempenho justamente para os processos que fazem restrições em relação a massas mínimas das peças testadas. O processo UCI teve piora no desvio padrão de 4,52% (resultado dos corpos-de-prova da junta soldada) para 7,34% e o processo Leeb de 3,53% para 9,63%. Para os demais processos, de modo geral, houve melhora no desempenho.

Neste trabalho foi também avaliado o desempenho dos processos que empregam equipamentos portáteis em relação a diferentes posições de medição. A ordem de grandeza das diferenças destes equipamentos para os resultados do processo de referência (pelo qual os corpos-de-prova foram medidos somente na posição horizontal) não foi alterada significativamente. Não foi detectada também nenhuma tendência significativa em relação a qualquer posição de medição.

Em relação à exatidão, o pior desempenho foi do processo Leeb, com diferença média para todas as posições de 3,82%. Para o desvio padrão, o pior desempenho foi para o processo UCI, que teve média de 5,7%, também consideradas todas as posições de medição. Esse fato se deve provavelmente ao tipo de sonda empregada por esse processo, que não permite nenhum apoio para a realização da indentação.

Nos pré-testes, as medições realizadas com o equipamento TIV apresentaram erros sistemáticos da ordem de 20 pontos de dureza para as regiões de metal base. A causa do problema foi a formação de uma “sombra” nas bordas das indentações, devidas à deformação do material de teste. A solução recomendada pelo fabricante foi o ajuste manual da linha que delimita a indentação para cada medição.

7.2 Sugestões de critérios para aceitação de medições de dureza com equipamentos portáteis nas regiões de soldas

- 1) Os processos que utilizam o método do rebote (Leeb Hardness) e o processo tipo Poldi não devem ser aceitos para medições de dureza nas zonas termicamente afetadas de soldas;
- 2) Para todos os processos de medição deve ser exigida a comprovação de conhecimento técnico e habilidade dos operadores, visto que a precisão dos resultados depende em parte da operação dos equipamentos;
- 3) Não há restrições em relação a medições em posições diferentes da horizontal para os equipamentos portáteis avaliados neste trabalho. Entretanto, para os modelos diferentes destes, deve ser comprovada a eficiência em relação a este aspecto. Caso não tenham sistemas de compensação automáticos, devem utilizar fatores de correção de acordo com normas específicas;
- 4) O posicionamento das indentações dentro da zona termicamente afetada deve ser especificado de modo a favorecer a detecção de valores máximos de dureza, ou seja, tão próximos da linha de fusão quanto possível e não necessariamente em linha reta.
- 5) A distância mínima entre as indentações e destas às bordas das peças testadas devem respeitar as recomendações das normas referentes aos princípios de medição empregados em cada caso. Devem ser observadas a faixa de dureza e as dimensões de cada região a ser medida.
- 6) As recomendações das normas relativas a massas e espessuras mínimas das peças a serem avaliadas, fixação e qualidade da superfície para cada processo de medição devem ser respeitadas.

8. CONCLUSÕES

O objetivo principal do trabalho foi atingido. A realização do levantamento de informações e os experimentos realizados forneceram subsídios suficientes para a sugestão de critérios para a aceitação de medições de dureza com equipamentos portáteis.

O levantamento de informações, que serviu como base para a realização do trabalho, possibilitou a compilação de informações relevantes para consulta dentro da companhia. Esse levantamento foi útil também para identificar pontos conflitantes entre normas internas e externas. A análise destes pontos serve como base para sugestões de melhorias nas normas da companhia.

A realização dos experimentos permitiu, além da avaliação dos desempenhos dos equipamentos, a constatação da necessidade de treinamento adequado para a utilização dos mesmos. Também permitiu avaliar a importância do conhecimento técnico.

Pelo fato de as medições em campo estarem sujeitas a fatores não presentes em laboratório, é necessário que o operador detecte prontamente as causas de possíveis variações nos resultados ligadas a desvios de procedimentos, falhas ou danos no equipamento.

Este trabalho contribui para o desenvolvimento do conhecimento na área de ensaios de dureza, visto que apresenta uma compilação de informações de diversas fontes, algumas reconhecidas internacionalmente.

A realização dos ensaios foi limitada por motivos técnicos, cronológicos e logísticos. Para o refinamento de critérios de aceitação de medições de dureza realizadas através de equipamentos portáteis e para a definição de novos critérios é necessária a realização de um trabalho mais extenso, tanto de revisão de fontes de consulta quanto de realização de experimentos.

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Revisão e aprofundamento no levantamento de informações realizado a respeito dos processos de dureza – portáteis ou não;
- Realização de experimentos com equipamentos de diferentes fabricantes e diferentes princípios de medição visando a complementação das informações apresentadas neste trabalho;
- Tratamento estatístico dos dados levantados nos experimentos realizados neste trabalho;
- Montagem de planilhas eletrônicas que permitam a organização e a consulta das informações de interesse, com acesso a hiperlinks onde possam ser visualizados esquemas explicativos, imagens ou filmes. Esse material poderá ser utilizado para treinamento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **American Society for Metals - Metals handbook:** Vol. 8 - Mechanical Testing and Evaluation, 9. ed. Ohio: Metals Park, 2000..
- [2] **American Society for Metals - Metals handbook:** Vol 6 - Welding, Brazing and Soldering, 9. ed. Ohio: Metals Park, 2000.
- [3] **ASME - Section VIII - Boiler and pressure vessel code,** The American Society of Mechanical Engineers - 2007
- [4] **ASME – Section IX -Welding and Brazing Qualifications,** The American Society of Mechanical Engineers - 2007
- [5] **ASTM A 370 - 08** - Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products1
- [6] **ASTM A 515/A 515M – 03 (Reapproved 2007)** - Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, for Intermediate- and Higher-Temperature Service
- [7] **ASTM A 516/A 516M – 06** - Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, for Moderate- and Lower-Temperature Service
- [8] **ASTM A 833-08a** - Standard Practice for Indentation Hardness of Metallic Materials by Comparison Hardness Testers
- [9] **ASTM A 956-06** - Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products
- [10] **ASTM A 1038-08** - Standard Practice for Portable Hardness Testing by the Ultrasonic Contact Impedance Method
- [11] **ASTM E92-82 (Reapproved. 03)** - Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials
- [12] **ASTM E140-07** - Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness
- [13] **ASTM E 10-07a** - Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials
- [14] **ASTM E 18–08a** - Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials
- [15] **ASTM E 103 – 84 (Reapproved 2002)** - Standard Test Method for Rapid Indentation Hardness Testing of Metallic Materials

- [16] **ASTM E 110 – 82 (Reapproved 2002)** - Standard Test Method for Indentation Hardness of Metallic Materials by Portable Hardness Testers.
- [17] **ASTM E 384 – 08a** - Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials.
- [18] **ASTM E 448 – 82 (Reapproved 2002)** - Standard Practice for Scleroscope Hardness Testing of Metallic Materials.
- [19] **Chiaverini, V** - Tecnologia Mecânica – Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas – 2ª. Ed. São Paulo – Ed. Pearson Education do Brasil, 1986
- [20] **Marques, P. V., Modenesi, P.J., Bracarense, A. Q.** – Soldagem – Fundamentos e Tecnologia – Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2005
- [21] **Modenesi, P. J., Marques, P.V., Santos, D. B.** - Introdução à Metalurgia da Soldagem Universidade Federal de Minas Gerais -Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (apostila- Belo Horizonte, maio de 2006)
- [22] **Montgomery, D.** Design and Analysis of Experiments - Arizona State University, 6th Edition, 2005.
- [23] **NACE Standard MR0103-2007** - Standard Material Requirements Materials Resistant to Sulfide Stress Cracking in Corrosive Petroleum Refining Environments
- [24] **NACE MR0175/ISO 15156:2001_2003** - Petroleum and natural gas industries - Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production
Part 1: General principles for selection of cracking-resistant materials
Part 2: Cracking-resistant carbon and low alloy steels, and the use of cast irons
Part 3: Cracking-resistant CRAs (corrosion-resistant alloys) and other alloys
- [25] **NACE SP0472-2008** - Methods and Controls to Prevent In-Service Environmental Cracking of Carbon Steel Weldments in Corrosive Petroleum Refining Environments
- [26] **Norma PETROBRAS - N-133 REV. J JUL / 2005** - Soldagem
- [27] **Norma PETROBRAS - N-268 REV. F MAI / 2006** – Fabricação de Vasos de Pressão
- [28] **Norma PETROBRAS - N-269 REV. E MAI / 2006** – Montagem de Vasos de Pressão
- [29] **Norma PETROBRAS - N-1704 REV. C SET / 2007** – Requisitos adicionais para Vasos de Pressão em Serviço com Hidrogênio
- [30] **Norma PETROBRAS - N-1706 REV. C MAI / 2007** – Projeto de Vasos de Pressão para Serviço com H₂S
- [31] **Sommer, J.** - **The Possibilities of Mobile Hardness Testing.** – Krautkrämer GmbH & Co, hürth, Germany
- [32] **Frank, S.** TIV (**ThroughIndenter Viewing**) **New Possibilities of Mobile Hardness Testing** Agfa NDT GmbH, RobertBosch Straße 3, D50354 Hürth Germanl

[33] Frank, S. **GE Inspection Technologies - Mobile Hardness Testing Application Guide for Hardness Testers** - General Electric Company, 2005.

[34] National Institute of Standards and Technology - Materials Science and Engineering Laboratory. Disponível em: < <http://www.nist.gov>>. Acesso em 28 janeiro 2009.

[35] NDTs Índia - Disponível em: <<http://www.ndts.co.in>> . Acesso em 28 janeiro 2009.

[36] NDT Database & e-Journal of Nondestructive Testing – Nondestructive Testing Activities, Needs and Trends in the Automotive Industry - G. Mozurkewich. Disponível em: <<http://www.ndt.net>>. Acesso em 28 janeiro 2009.

[37] NDT Database & e-Journal of Nondestructive Testing – Multiple NDT Methods in the Automotive Industry - P. Buschke, W.Roye, T. Dahmen. Disponível em: <<http://www.ndt.net>> . Acesso em 28 janeiro 2009

[38] The Welding Institute - Disponível em: <<http://www.twi.co.uk>> . Acesso em 29 janeiro 2009

[39] GE Sensing & Inspection Technologies – Hardness Testing - Disponível em: < <http://www.geinspectiontechnologies.com>> . Acesso em 29 janeiro 2009

[40] Surface Engineering Fórum – Hardness Testing – Disponível em: <<http://www.gordonengland.co.uk>> Acesso em 29 janeiro 2009

ANEXO I

Equipamentos utilizados

Durômetro de bancada EMCOTEST

- Modelo: M4U 075;
- Faixa de carga (N): 49 – 7355;
- Capacidade vertical - peça (mm): 160;
- Capacidade em peso (kg): 160;
- Aumento: até 320 x;
- Processos de medição de dureza:
- Brinell: EN ISO 6506 / ASTM E10;
- Vickers: EN ISO 6507 / ASTM E92 ;
- Rockwell: EN ISO 6508 / ASTM E18;

Microdurômetro BUEHLER

- Modelo: MICROMET 5103;
- Faixa de carga (gf): 10 – 1000 (10 gf, 25 gf, 50 gf, 100 gf, 200 gf, 300 gf, 500 gf, 1000 gf);
- Aumento: 10x e 50x;
- Calibração: ASTM E 384-99;
- Resolução de medição: 0,01 μm ;
- Curso da mesa: 25 mm
- Resolução de leitura do deslocamento da mesa: 1 μm ;

Durômetro portátil GE

- Modelo: MIC 20
- Técnicas de medição: Ultrasonic Contact Impedance (UCI); Leeb Hardness
- Faixas de medição/ conversões: (UCI): 20-1740 HV / 76-618 HB / 41-105 HRB / 20.3-68.0 HRC / 255-2180 N/mm²
- Faixas de medição/ conversões: (LEEB): 150-1000 HL / 75-1000 HV / 75-700 HB / 30-100 HS / 35-100 HRB / 19-70 HRC / 250-2200 N/mm²
- Conversão automática de acordo com DIN 50150, ASTM E 140

Durômetro portátil GE

- Modelo: TIV
- Técnica de medição: Through Indenter Viewing
- Faixas de medição/ conversões: Para sonda TIV 105: aprox. 100 HV – 1000 HV,
Para sonda TIV 101: aprox. 30 HV – 500 HV
- Escalas de conversão e resolução: HV (1.0); HB (1.0); HS (1.0/0.5/0.1); HRC (1.0/0.5/0.1);
HRB (1.0/0.5/0.1); N/mm² (5.0)
- Conversão automática de acordo com DIN 50150, ASTM E140