

**NATALIE CHAVES DE SIQUEIRA**

**SOFIA SANCHES MARCHESI**

**DETERMINAÇÃO POR MEIO DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS DA  
INFLUÊNCIA DO LIXAMENTO NAS MEDIDAS DE DUREZA COM DURÔMETRO  
PORTÁTIL DE MÉTODO UCI**

**Guaratinguetá**

**2012**

**UNESP**  
**Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá**

**Guaratinguetá**  
**2012**

**NATALIE CHAVES DE SIQUEIRA**

**SOFIA SANCHES MARCHESI**

**DETERMINAÇÃO POR MEIO DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS DA  
INFLUÊNCIA DO LIXAMENTO NAS MEDIDAS DE DUREZA COM DURÔMETRO  
PORTÁTIL DE MÉTODO UCI**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelino P. Nascimento

Co-orientador: Prof. Ms Cristie Diego Pimenta

S618d Siqueira, Natalie Chaves de  
Determinação por meio de planejamento de experimentos da influência do lixamento nas medidas de dureza com durômetro portátil de método UCI / Natalie Chaves de Siqueira, Sofia Sanches Marchesi – Guaratinguetá : [s.n], 2012.  
69 f. : il.  
Bibliografia: f. 49-54

Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.  
Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento  
Co-orientador: Prof<sup>a</sup>. Msc Cristie Diego Pimenta

1. Planejamento experimental I. Marchesi, Sofia Sanches II. Título

CDU 519.242

**DETERMINAÇÃO POR MEIO DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS DA  
INFLUÊNCIA DO LIXAMENTO NAS MEDIDAS DE DUREZA COM DURÔMETRO  
PORTÁTIL DE MÉTODO UCI**

**NATALIE CHAVES DE SIQUEIRA**

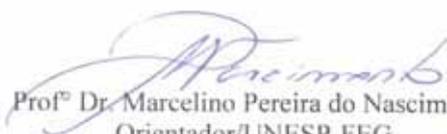
**SOFIA SANCHES MARCHESI**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
**"GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS"**  
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

  
Prof<sup>o</sup> Dr. Marcos Valério Ribeiro

Coordenador

**BANCA EXAMINADORA**

  
Prof<sup>o</sup> Dr. Marcelino Pereira do Nascimento  
Orientador/UNESP-FEG

  
Prof<sup>a</sup>. Ms. Cristine Diego Pimenta  
Co-Orientador/UNESP-FEG

  
Prof<sup>o</sup> Dr. Marcos Valério Ribeiro

UNESP-FEG

Guaratinguetá  
2012

## **DADOS CURRICULARES**

### **NATALIE CHAVES DE SIQUEIRA**

NASCIMENTO 08.03.1984 – SÃO PAULO / SP

FILIAÇÃO Orlando Mariano de Siqueira  
Jeane Vieira Chaves de Siqueira

2008/2012 Curso de Graduação  
Engenharia de Materiais - Universidade Estadual Paulista Júlio  
de Mesquita Filho - UNESP

### **SOFIA SANCHES MARCHESI**

NASCIMENTO 12.04.1989 – BAURU / SP

FILIAÇÃO Celso de Oliveira Marchesi  
Lilian Rosângela Sanches Marchesi

2008/2012 Curso de Graduação  
Engenharia de Materiais - Universidade Estadual Paulista Júlio  
de Mesquita Filho - UNESP

SIQUEIRA, N.C.; MARCHESI, S.S. **Determinação por meio de planejamento de experimentos da influência do lixamento nas medidas de dureza com durômetro portátil.** 2012. 74 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

## RESUMO

A dureza possui papel importante no controle de qualidade, nos estudos de pesquisas mecânicas e metalúrgicas e na especificação, seleção e comparação de diversos materiais. Essa propriedade é de extrema importância na indústria petroleira, pois é um fator determinante para verificar a segurança do material empregado em vasos de pressão e dutos. Devido à impossibilidade de parada do equipamento durante a verificação da dureza, são amplamente utilizados os durômetros portáteis de método UCI, cuja grande vantagem está no fato de ser um ensaio rápido, de realização simples e ser considerado um ensaio não destrutivo com um boa relação custo benefício. O objetivo do trabalho é determinar se há diferença significativa nas medidas de dureza entre as lixas 80 e 1200 por meio de um durômetro portátil de método UCI, no material aplicado em esferas de armazenamento de gás de composição ASTM 516 Gr 70. Após seleção da peça de maior homogeneidade, foi realizado o perfil de dureza para isolar os fatores de grande influencia na dureza da peça: laminação a frio e segregação de impurezas. Os fatores Resfriamento e Lixamento foram analisados através do método de planejamento de experimentos (DOE), no qual foi demonstrado que nenhuma das duas variáveis, nem suas interações, tem influência significativa nas medidas de dureza pelo equipamento portátil MIC 10. Tal fato acarretará em diminuição em tempo e custo de preparação da superfície.

**PALAVRAS-CHAVE:** Durômetro portátil. MIC 10. Planejamento de Experimentos (DOE). UCI. Impedância de Contato.

SIQUEIRA, N.C.; MARCHESI, S.S. **Determination by means of design of experiments on the influence of sanding durometer hardness measurements with handheld MIC 10.** 2012. 74 f. Work Graduate (Degree in Materials Engineering) - College of Engineering Campus Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

### **ABSTRACT**

The hardness has an important role in quality control, in research studies and metallurgical and mechanical specification, selection and comparison of various materials. This property is of extreme importance in the oil industry because it is a determining factor to ascertain the safety of the material used in pressure vessels and pipelines. Due to the inability to stop the equipment while checking the hardness, the hardness testers are widely used portable method UCI, its great advantage is the fact that an essay fast, simple realization and not be considered a non-destructive testing with a good relationship money. The objective is to determine if there is significant difference in hardness measurements between 80 and 1200 sandpaper using a portable hardness tester UCI method, the material applied in gas storage spheres composition ASTM 516 Gr 70. After determining the number of homogeneity, we performed the hardness profile to isolate the major factors influencing the hardness part: cold rolling and segregation of impurities. Factors Cooling and sanding were analyzed using the method of design of experiments (DOE), in which it was demonstrated that neither variables nor their interactions, has significant influence on the hardness measurements by portable MIC 10. This fact will lead to reduction in time and cost for surface preparation.

**KEYWORDS:** Portable hardness tester. MIC 10. Design of Experiments (DOE). UCI. Ultrasonic Contact Impedance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Penetrador Vickers. [Adaptado ASTM E384-11].	3
Figura 2 - Esquema representativo de aplicação do método Vickers [Adaptado de Askeland, 1996; ASTM 92].	3
Figura 3 - Tipos de indentação. (a) indentação perfeita, (b) Indentação com afundamento, (c) indentação com aderência (DIETER, 1988).	5
Figura 4 - Tipos de indentação e diferentes diâmetros (DIETER, 1988).	5
Figura 5 - A carga é aumenta com a dureza e não há uma continuidade na escala (SOUZA, 1982).	6
Figura 6 - Ilustração com aplicação de carga usando esfera de diâmetro D (SOUZA, 1982).	7
Figura 7 - Escala comparativa dos valores para os vários métodos de dureza. [Adaptado Jastrzebski, 1987].	9
Figura 8 - Equipamento de dureza portátil de método UCI modelo MIC 20 da marca GE.	10
Figura 9 - Equipamento de dureza portátil de método UCI modelo MIC 10 da marca GE.	11
Figura 10 - Escala de dureza Vickers.	12
Figura 11 - Variação da frequência no UCI em função da dureza (HERRMANN, 2011).	13
Figura 12 - Sistema da sonda do equipamento UCI.	13
Figura 13 - Perfil de uma peça com ondulação e rugosidade (PALMA, 2008).	15
Figura 14 - Frequência da rugosidade em uma peça (PALMA, 2008).	16
Figura 15 - Trechos no processo de medição da rugosidade (PALMA, 2008).	16
Figura 16 - Sistematização de projeto de experimento.[Adaptado de Montgomery 1997].	20
Figura 17 - Dimensões do bloco e de cada cdp (MB e MS).	27
Figura 18 - Espectrômetro móvel de emissão óptica SPECTRO TXC03.	28
Figura 19 - Peça inteira e os 15 corpos de prova seccionados.	28
Figura 20 - Retífica pneumática Prep Tool Blue Point AT401.	29
Figura 21 - Corpo de prova 11 Nital 10% e lixamento até 1200 - segregações de impurezas na parte central da peça.	29
Figura 22 - Equipamento MIC 10, sonda e suporte micrométrico [ figura retirada do Application Guide Portable Testers – GE Inspection Technologies].	30
Figura 23 - Ensaio de dureza com durômetro portátil MIC 10.	30
Figura 24 - Ilustração da coleta dados no cdp.	31
Figura 25 – Perfil de dureza transversal CDP 11 (todas as distâncias).	34

Figura 26 – Perfil de dureza transversal CDP 11 (Médias das distâncias).....	34
Figura 27 - Medidas de dureza nas linhas 1 e 6 em função do lixamento com granulometria de 80 e 1200. ....	35
Figura 28 - Comparação entre lixa 80 e 1200 - Linha 1.....	36
Figura 29 - Comparação entre lixa 80 e 1200 - Linha 6.....	37
Figura 30 - Efeitos dos fatores sobre a média da resposta (Dureza). ....	39
Figura 31 - Gráfico de Pareto, com os fatores influentes. ....	41
Figura 32 - Análise gráfica do resíduo das medidas de dureza - (a) Gráfico probabilidade normal versus resíduo ; (b) Gráfico de dispersão; (c) Gráfico de histograma e (d) Gráfico ordem de observação versus resíduo. ....	42
Figura 33 - Gráfico probabilidade normal versus resíduo.....	43
Figura 34 - Carta de controle de valor individual e Amplitude móvel.....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise química do cdp 11. ....	32
Tabela 2 - Médias do perfil de dureza do cdp 11. ....	33
Tabela 3 - Valores de dureza longitudinal CDP 11 - Com lixas 80 e 1200.....	35
Tabela 4 - Experimento com 2 <sup>2</sup> fatorial obtido no Minitab.....	38
Tabela 5 - Análise de variância da Dureza. ....	41

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Aplicação típica do UCI para diferentes cargas de teste. ....	14
Quadro 2 - Matriz de planejamento do experimento $2^3$ .....	23
Quadro 3 - Dados típicos de experimentos fatoriais com 2 fatores. ....	26

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVO.....	1
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3.1.	Ensaaios de dureza .....	2
3.1.1.	Ensaio de dureza Vickers .....	3
3.1.1.1.	Defeitos de impressão Vickers .....	5
3.1.1.2.	Comparação do ensaio Brinell e Vickers .....	6
3.1.2.	Ensaio de dureza Brinell.....	7
3.1.3.	Ensaio de dureza Rockell .....	8
3.1.4.	Ensaio de dureza por Impedância de Contato Ultrassônico (UCI) .....	10
3.2.	Rugosidade .....	15
3.2.1.	Conceito de Rugosidade.....	15
3.2.2.	Sistemas de medição da rugosidade superficial .....	16
3.2.3.	Parâmetros de avaliação da rugosidade.....	17
3.2.3.1.	Rugosidade média (Ra) .....	17
3.2.4.	Outros parâmetros de avaliação da rugosidade .....	18
3.2.4.1.	Desvio médio quadrático (Rq) .....	18
3.2.4.2.	Rugosidade (R <sub>Z</sub> ) .....	18
3.2.4.3.	Influência do lixamento na rugosidade .....	19
3.3.	Planejamento de experimentos.....	19
3.3.1.	Diretrizes para o planejamento de experimentos .....	19
3.3.2.	Planejamento fatorial.....	22
3.3.2.1.	Vantagens no uso do planejamento experimental .....	22
3.3.3.	Planejamento Fatorial 2 <sup>k</sup> .....	23
3.4.	Análise de variância .....	24

3.4.1.	Tabela ANOVA.....	25
4.	METODOLOGIA .....	27
4.1.	Material .....	27
4.2.	Métodos .....	27
5.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	32
5.1.	Discussões baseadas nas propriedades do material.....	32
5.2.	Discussões baseadas em tratamento estatístico .....	37
6.	CONCLUSÃO.....	45
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	47

## **1. INTRODUÇÃO**

Os testes de dureza são amplamente aplicados devido ao seu baixo custo e relativa facilidade de utilização (BUSCHOW, 2001). A dureza possui papel importante no controle de qualidade, nos estudos de pesquisas mecânicas e metalúrgicas e na especificação, seleção e comparação de diversos materiais (SOUZA, 1982) (BUSCHOW, 2001).

O conceito dessa propriedade não possui uma definição universal, sendo interpretado de várias maneiras dependendo de sua aplicação na indústria. A interpretação mais abrangente e utilizada na engenharia é de que a dureza é a medida da resistência oferecida quando pressionado por um indentador/penetrador de material mais duro (BUSCHOW, 2001). A resistência a indentação pode ser devido à deformação plástica (metais e ligas), elástica (elastômeros) ou elastoplástica (cerâmicas) (BUSCHOW, 2001).

O método mais antigo de ensaio de dureza foi baseado na escala de Mohs (1822), consistindo em uma tabela com dez minerais organizados em ordem crescente da possibilidade de ser riscado pelo mineral seguinte (SOUZA, 1982) (BUSCHOW, 2001). Este método qualitativo possibilitou o aprimoramento da determinação da dureza por meio de outros métodos, com utilização de indentadores para a medida da profundidade ou dimensão (diâmetro ou diagonal) da indentação (BUSCHOW, 2001).

## **2. OBJETIVO**

Determinar a influência do lixamento no material ASTM 516 Gr 70 nas medidas de dureza no durômetro portátil de método UCI modelo MIC 10, através de planejamento Fatorial (DOE).

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Ensaios de dureza

Os ensaios de dureza são usualmente classificados em microdureza ( $\geq 1\text{kgf}$ ) e macrodureza ( $< 1\text{kgf}$ ). Já Meyers (2009), considera essa divisão imprópria classificando os testes em nanoindentação, microindentação e macroindentação. Existe uma variedade de técnicas que podem ser divididas em:

- Ensaios de dureza por indentação: Brinell, Knoop, Rockwell, Vickers e UCI;
- Ensaios de dureza por rebote: Leeb e Escleroscópio;
- Ensaios de dureza por risco: Mohs;
- Ensaios de dureza por abrasão;
- Ensaios de dureza por erosão [ASM e BUSCHOW, 2001].

A maioria dos testes é realizada por meio de ensaio de dureza por indentação ou ensaio de dureza por rebote. Esse último é mais empregado em medições de dureza de grandes peças e/ou quando o tamanho da impressão deixada no material pode ser tolerado (BUSCHOW, 2001).

Vários fatores influenciam na seleção do melhor método de teste, como o tamanho e formato da amostra, rugosidade, faixa de dureza, tratamento superficial, homogeneidade/heterogeneidade, efeito do tamanho da indentação no cdp e número de peças a serem ensaiadas (BUSCHOW, 2001). Para seleção do tipo de teste mais adequado, é essencial ter algum conhecimento inicial sobre a composição, processamento e tratamento térmico do material que será testado (BUSCHOW, 2001).

O ensaio de dureza é amplamente usado na indústria, pois fornece dados quantitativos das características de resistência a deformação permanente das peças produzidas. Recentes trabalhos propõem a utilização dos ensaios de indentação como uma ferramenta capaz de avaliar características mecânicas como o módulo de Young ( $E$ ), a tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) e uma curva do comportamento da tensão *versus* deformação sob compressão destes materiais (FISCHER-CRIPPS, 2006).

### 3.1.1. Ensaio de dureza Vickers

O ensaio de dureza Vickers é uma técnica utilizada há décadas para avaliação da dureza superficial de materiais metálicos, cerâmicos, compósitos e, recentemente, filmes finos (DIAS, GODOY, MODENESI, 2010).

Este método foi introduzido por Smith e Sandland em 1925, recebeu este nome devido à companhia *Vickers-Armstrong Ltda*, que fabricou as máquinas para operar este tipo de equipamento (GARCIA, 2008), conforme Figura 1 e Figura 2.

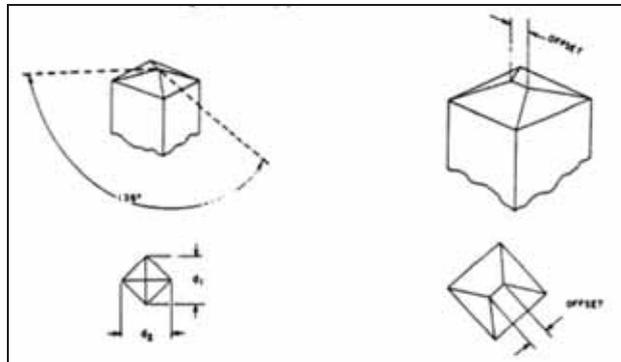


Figura 1 - Penetrador Vickers. [Adaptado ASTM E384-11].

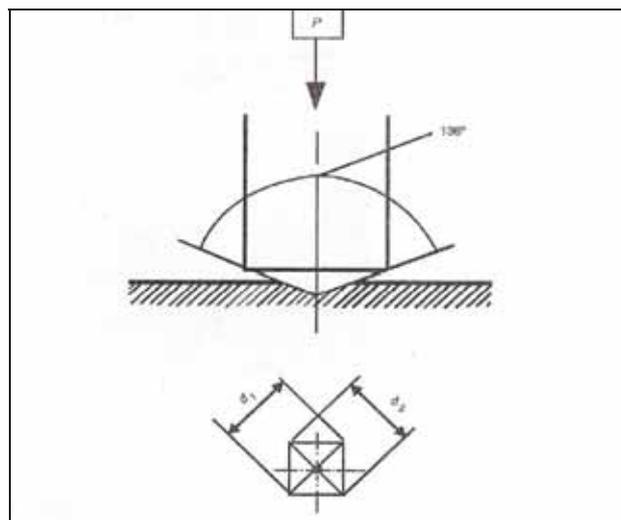


Figura 2 - Esquema representativo de aplicação do método Vickers [Adaptado de Askeland, 1996; ASTM 92].

A forma da impressão neste ensaio é de um losango regular, cujas diagonais são medidas com a ajuda de um microscópio acoplado a máquina. Para materiais isotrópicos as diagonais apresentam o mesmo comprimento (ASTM E384-11). A média destas duas medidas é utilizada para determinação da dureza Vickers.

$$HV = \frac{0,102 \times 2 \times P \times \sin(\theta/2)}{d^2} = 0,189 \times \frac{P}{d^2} \quad \text{equação (1)}$$

Onde:

P= carga (N);

D=comprimento da diagonal da impressão [mm] e  $\theta=136^\circ$

Atualmente existem tabelas que fornecem valores da dureza Vickers a partir das diagonais formadas na impressão, não sendo necessário o cálculo de HV (GARCIA, 2008), como dada pela equação (1).

Durante o ciclo do ensaio, a máquina de teste deve estar protegida contra choques ou vibrações. A fim de minimizar vibrações, o operador deve evitar o contato com a máquina durante o ciclo. O penetrador (ver Figura 2) tem a ponta altamente polida, com ponta de diamante na forma piramidal de base quadrada, com ângulos de face de  $136^\circ$  (DIETER, 1988). O ângulo de  $136^\circ$  foi escolhido pela proximidade de ângulo formado no ensaio de dureza Brinell, se tomarmos os pontos em que a esfera toca a superfície do espécime, e desenhar retas perpendiculares ao raio, a sua intersecção irá formar um ângulo de  $136^\circ$  (MEYERS, 2009).

### 3.1.1.1. Defeitos de impressão Vickers

No ensaio Vickers, uma indentação perfeita seria impressa na amostra na forma de um quadrado. No entanto, existem anomalias recorrentes ao processo, dois tipos são os mais comuns: indentação com afundamento e a indentação com aderência.

O recuo impressão com afundamento é o resultado do afundamento do metal em torno das faces planas da pirâmide. Essa condição é observada em metais recozidos e resulta em uma superestimativa do comprimento da diagonal. A indentação com aderência é encontrada em metais trabalhados a frio. Seu resultado é proveniente do amontoado ou empilhamento do metal em torno das faces do penetrador, gerando enrugamento do metal em torno das faces da medição do indentador (DIETER, 1988), conforme Figura 3 e Figura 4.

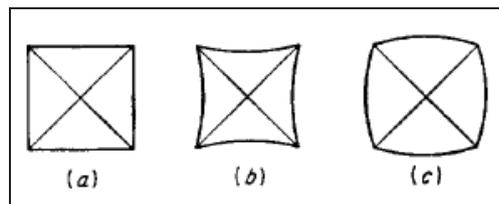


Figura 3 - Tipos de indentação. (a) indentação perfeita, (b) Indentação com afundamento, (c) indentação com aderência (DIETER, 1988).

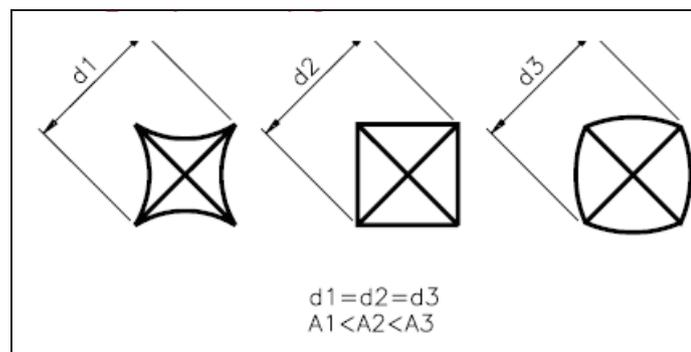


Figura 4 - Tipos de indentação e diferentes diâmetros (DIETER, 1988).

Quando esses tipos de defeitos ocorrem, embora as condições de ensaio sejam as mesmas, a área de impressão será diferente, portanto suas diagonais também o serão. Como o

cálculo de dureza utiliza as médias das diagonais, estes erros geram valores diferentes de dureza. Para a correção deste defeito, aumenta-se a carga do ensaio para mais ou para menos dependendo do material e do tipo de defeito apresentado (DIETER, 1988).

Uma das vantagens conhecidas do teste Vickers é o seu penetrador, que abrange todos os materiais, desde o mais macio até os mais duros (MEYERS, 2009).

### 3.1.1.2. Comparação do ensaio Brinell e Vickers

O ensaio Vickers produz valores de impressão semelhantes aos da dureza Brinell. Isso ocorre porque o ângulo de  $136^\circ$  da ponta de diamante produz uma impressão que mantém a relação ideal de 0,375 entre o diâmetro da calota esférica ( $d$ ) e o diâmetro da esfera do penetrador Brinell ( $D$ ), seja qual for a carga aplicada. É isso o que mostra o desenho ao lado. O uso de cargas diferentes é necessário para se obter uma impressão regular, sem deformação e de tamanho compatível com o visor da máquina (SOUZA, 1982), conforme Figura 5.

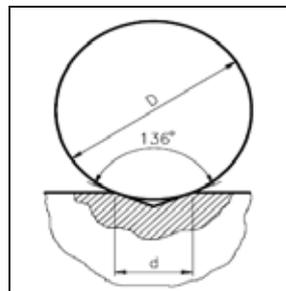


Figura 5 - A carga é aumentada com a dureza e não há uma continuidade na escala (SOUZA, 1982).

Outra vantagem, ao contrário do que ocorre no ensaio Brinell, as cargas podem ser de qualquer valor, pois as impressões são sempre proporcionais à carga, para um mesmo material, o valor de dureza será o mesmo independente da carga utilizada (DIETER, 1988). Para aplicações específicas, voltadas principalmente para superfícies tratadas (carbonetação, têmpera) ou para a determinação de dureza de microconstituintes individuais de uma microestrutura, utiliza-se o ensaio de microdureza Vickers. A microdureza Vickers envolve o mesmo procedimento prático que o ensaio Vickers, só que utiliza cargas menores que 1 kgf.

Podendo variar até valores pequenos como 10 gf. A impressão produzida é microscópica (DIETER, 1988).

### 3.1.2. Ensaio de dureza Brinell

Foi proposta em 1900 por J..A. Brinell, o ensaio consiste na compressão de uma esfera temperada de aço temperado ou carboneto de tungstênio de diâmetro  $D$  sobre uma superfície plana, polida e limpa de um metal, por meio de uma carga  $F$ , durante um tempo  $t$ , produzindo uma calota esférica de diâmetro  $d$ . A dureza Brinell é representada pela sigla HB ( vêm do inglês Hardness Brinell) , apresenta uma relação entre a carga aplicada ( $F$ ) e a área da calota esférica impressa no material ensaiado ( $A_c$ ), de acordo com a equação 2.

$$HB = \frac{F}{A_c} \quad \text{equação (2)}$$

Sendo  $A_c$  dado pela fórmula  $\pi Dp$ , onde  $p$  é a profundidade da calota . Devido a dificuldade de obtenção do valor de  $p$ , utiliza-se uma relação matemática entre a profundidade e o diâmetro da calota, conforme equação 3.

$$HB = \frac{2 \times F}{\pi \times D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad \text{equação (3)}$$

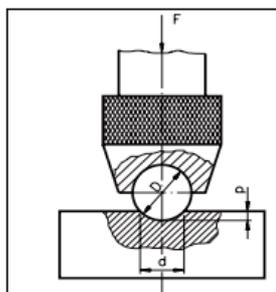


Figura 6 - Ilustração com aplicação de carga usando esfera de diâmetro  $D$  (SOUZA, 1982).

A correlação entre o limite de resistência a tração e a dureza Brinell se faz muito útil quando não se dispõem de máquina de ensaio de tração esta relação é dada pela equação (4).

$$\sigma = \alpha \times HB \quad \text{equação (4)}$$

Onde:

$\sigma$ =limite de resistência a tração (MPa )

$\alpha$ =constante experimental.

Para durezas acima de 380 esta relação não deve ser aplicada, pois a dureza passa a crescer mais rapidamente do que o limite de resistência a tração (GARCIA, 2008).

### 3.1.3. Ensaio de dureza Rockwell

Em 1922, Rockwell desenvolveu um método de determinação de dureza que utilizava uma pré-carga, este é o ensaio mais utilizado internacionalmente. O ensaio utiliza-se da profundidade de impressão causada por um penetrador, que pode ser esférico (esfera de aço temperado) ou cônico (cone de diamante com 120 de conicidade), sobre ação de uma carga como indicador da medida de dureza, e não há relação com a área de impressão, como no caso Brinell (GARCIA, 2008).

A ação de uma pré-carga é necessária para eliminar a ação de eventuais defeitos superficiais e ajudar na fixação do corpo-de-prova no suporte, eliminando erros causados pela deformação plástica. O número de dureza Rockwell é representado pela sigla HR, seguido da escala utilizada e ocasionalmente da carga aplicada.

As vantagens da realização do ensaio Rockwell em relação ao Brinell são a rapidez de execução, maior exatidão e isenção de erros pequeno tamanho de impressão. Uma desvantagem deste ensaio se faz na obtenção do valor de tração, que no ensaio Brinell já é possível, outra limitação do ensaio Rockwell se faz na descontinuidade de sua escala,



### 3.1.4. Ensaio de dureza por Impedância de Contato Ultrassônico (UCI)

O procedimento de medição por UCI (“*Ultrasonic Contact Impedance*”) está cada vez ganhando mais campo em relação aos métodos convencionais – Brinell, Rockell, Vickers e microdureza. Um dos seus diferenciais é ser um aparelho portátil podendo ser utilizado em áreas de difícil acesso (FRANK,2001). É de fácil utilização e conseqüente maior rapidez de ensaio – podem ser feitos mais de 1200 indentações por hora (SZILARD, 1984). Além disso, a pequena marca deixada pelo indentador possibilita a aplicação em áreas de pequenas dimensões como, por exemplo, na zona termicamente afetada de uma solda com apenas 2 a 3 mm de largura. Devido à pequena indentação, é pode ser considerado um ensaio não destrutivo. Por esse motivo e sua portabilidade, é muito aplicado em equipamentos em campo (SZILARD, 1984).

Esse mesmo fator que faz do ensaio um diferencial, também o limita. Devido à pequena impressão, materiais com alta heterogeneidade como o ferro fundido, terão grandes variações dependendo da área indentada (SZILARD, 1984). Nestes casos, indentadores maiores (Rockell, Brinell e Rebote) são os mais indicados, de acordo com a Figura 8 e Figura 9.



Figura 8 - Equipamento de dureza portátil de método UCI modelo MIC 20 da marca GE.



Figura 9 - Equipamento de dureza portátil de método UCI modelo MIC 10 da marca GE.

A preparação indevida do material a ser ensaiado pode causar erros grosseiros de valor. Além de a superfície estar totalmente limpa, deve-se ter um cuidado extra com a rugosidade da peça. Para um bom resultado, a rugosidade deve ser baixa, sendo dependente da carga aplicada [ASTM A1038 -1]. Isto é um fator importante, já que o equipamento UCI tem seu foco e aplicação em campo. Nesta situação, não há uma grande preocupação com a qualidade superficial da peça. No máximo é utilizada uma lixa de granulometria 280  $\mu\text{m}$ , sendo que o recomendado seria fazer lixamento até granulometria de 1200  $\mu\text{m}$ . Além do fator rugosidade, materiais de granulação grosseira, a carga aplicada deve ser maior do que em peças homogêneas [ASTM A1038 -10a].

Este método pode ser utilizado em uma variedade de materiais contanto que a sonda esteja posicionada perpendicularmente à peça ensaiada.

Apesar no teste UCI utilizar um indentador de diamante tal como o ensaio Vickers de bancada, o ultrassônico não determina os valores de dureza opticamente. A área de indentação é detectada por meio da mudança da frequência ultrassônica. A sonda do UCI é normalmente de diamante Vickers fixada em uma haste de metal. Esta haste é excitada durante o ensaio em uma oscilação longitudinal de 70000 Hz por um transdutor piezométrico (SOMMER, 1998).

O princípio de funcionamento consiste basicamente da variação da frequência de ressonância quando em contato com a superfície do material (KLEESATTEL, 1968). A

haste oscila em uma frequência ultrassônica, onde em sua ponta há o indentador Vickers que é pressionado contra a peça com uma força pré-determinada (HERRMANN, 2011). Essa frequência de ressonância aumenta assim que o indentador é colocado em contato com a amostra e só cessa quando a impressão está completa (HERRMANN, 2011).

A variação da frequência de ressonância  $\Delta f$  depende do tamanho da área de contato (A) e do módulo de elasticidade (E). Os valores da dureza UCI estão normalmente na escala de dureza Vickers, como mostra o esquema da Figura 10, abaixo:

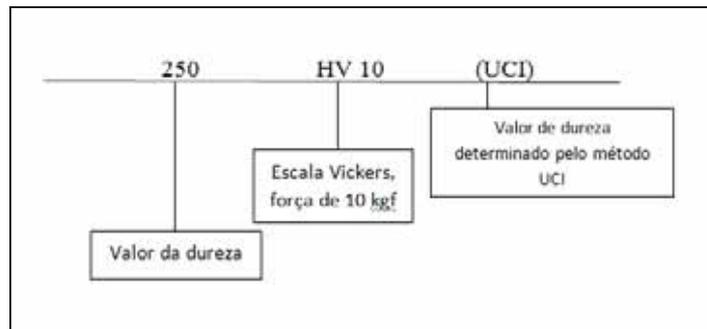


Figura 10 - Escala de dureza Vickers.

Como a variação da frequência  $\Delta f$ , depende do módulo de elasticidade efetiva,  $E_{eff}$ , e da área de contato, A, (como mostra a equação 5), tem-se a relação entre as variáveis:

$$\Delta f = f * (E_{eff} * A) \quad \text{equação (5)}$$

O módulo de elasticidade efetiva ( $E_{eff}$ ) é o valor do módulo do sistema global, composto pelo material ensaiado e a haste oscilante. Portanto, a dureza do material é obtida pela equação:

$$HV(UCI) = f * \left(\frac{1}{\Delta f}\right) \quad \text{equação (6)}$$

O equipamento UCI é composto basicamente de uma sonda (equação 5), um medidor eletrônico e um *display* para determinação da variação da frequência (equação 6). Seu indentador é similar ao do Vicker de bancada, possuindo a forma piramidal de base quadrada com ângulo entre suas faces opostas de  $136^\circ$  (HERRMANN, 2011), Figura 11 e Figura 12.

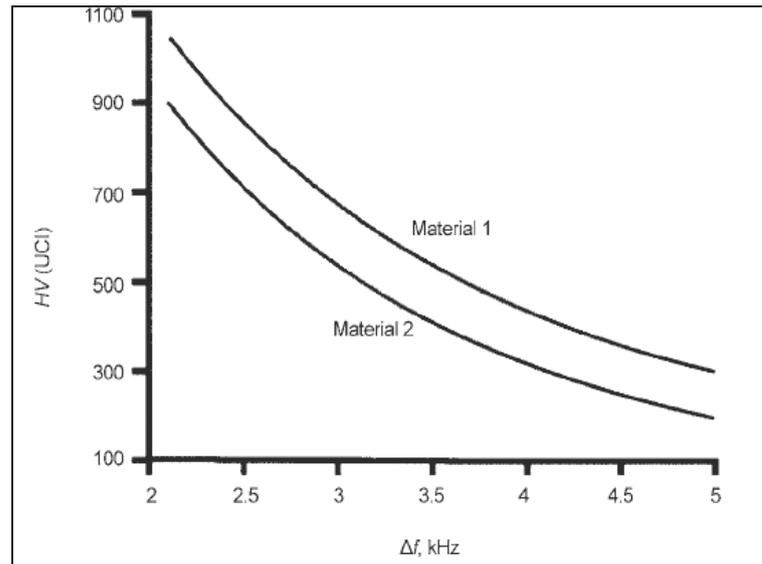


Figura 11 - Variação da frequência no UCI em função da dureza (HERRMANN, 2011).

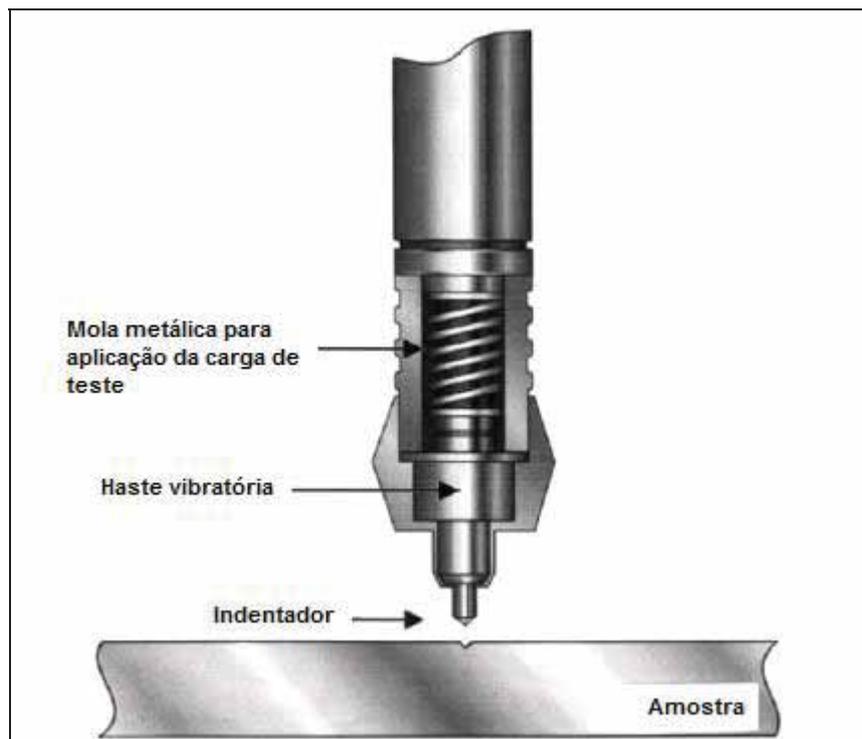


Figura 12 - Sistema da sonda do equipamento UCI.

As sondas do equipamento UCI vão desde 1 a 98 N. A escolha da melhor carga depende de vários fatores: tipo de material, homogeneidade, equipamento, etc. No Quadro 1 mostra as aplicações típicas do UCI em função da carga aplicada.

Quadro 1 - Aplicação típica do UCI para diferentes cargas de teste.

<b>Carga aplicada</b>	<b>Aplicação típica</b>
<b>98 N</b>	Forjas pequenas, junta soldada, ZTA.
<b>50 N</b>	Partes de máquinas de indução, eixo de comando de válvulas, turbinas, juntas soldadas, ZTA.
<b>10 N</b>	Matriz de gravação, moldes, prensas e paredes finas.
<b>8 N</b>	Partes de precisão, engrenagens e cones de rolamento.
<b>3 N</b>	Camadas de cobre e cromo em cilindros de aço ( $t \geq 0,040\text{mm}$ ), revestimentos e camadas endurecidas ( $t \geq 0,020\text{mm}$ ).
<b>1 N</b>	Filmes finos de superfície polida.

Para Kleesattel (1968), os ensaios de dureza são divididos em três grupos: a) Método de indentação direta – ensaios de bancada como Vickers, Rockwell, Brinell; b) Método indireto – correlaciona propriedades físicas (condutibilidade elétrica, permeabilidade magnética, difração de raios X) da amostra com a sua dureza; c) Método de indentação com medição indireta – Rebote, método de resistência ao contato e UCI. Kleesattel (1968) verificou que os métodos de indentação direta possui uma recuperação elástica que depende do módulo de elasticidade do material, causando uma fonte de erro. No caso dos métodos de indentação com medição indireta, o valor é medido enquanto o indentador está em contato com o material, evitando a recuperação elástica da peça.

## 3.2. Rugosidade

### 3.2.1. Conceito de Rugosidade

A medição de rugosidade merece uma atenção especial, pois à medida que cresce a necessidade de peças próximas da perfeição, a qualidade superficial se torna um fator relevante (DIAS, 1980).

A rugosidade superficial é um tipo de erosão microscópica produzida por desgaste abrasivo (INFORMATIVO TÉCNICO, 2012). Para a medida de rugosidade usa-se o rugosímetro e sua unidade de medida é em microns.

No Brasil a norma ABNT NBR ISO 4287:2002 traz os conceitos definidos para a rugosidade superficial. Quando realizado a medida de rugosidade em um material, este apresenta dois tipos de perfis, compostos por ondulações e rugosidade superficial. As ondulações são o conjunto das irregularidades repetidas em ondas de comprimento superior a amplitude e baixa frequência. Já a rugosidade superficial é o conjunto de irregularidades repetidas em ondas de comprimento semelhantes à amplitude de alta frequência, de acordo com a Figura 13.

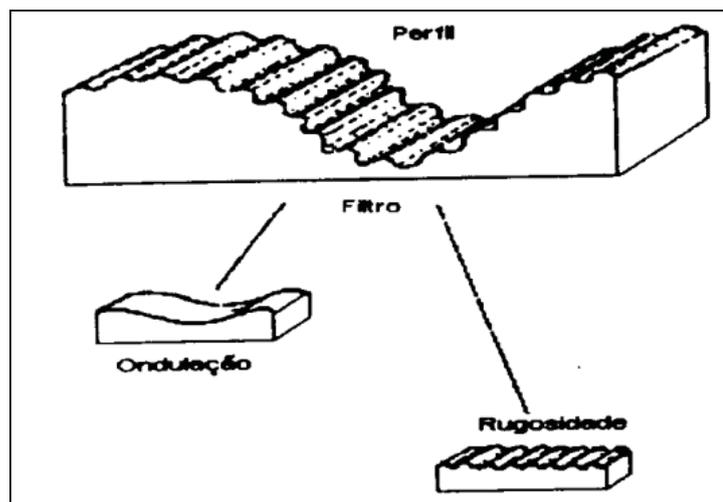


Figura 13 - Perfil de uma peça com ondulação e rugosidade (PALMA, 2008).

Para a medida de rugosidade é necessário utilizar um filtro, que seleciona a frequência do perfil rugosidade e retém os demais desvios. Essa frequência pré-determinada é chamada

*cut-off*. Os sinais de rugosidade apresentam alta frequência enquanto os demais, baixa frequência, são os chamados filtros Passa-Alta (PALMA, 2008), conforme Figura 14.

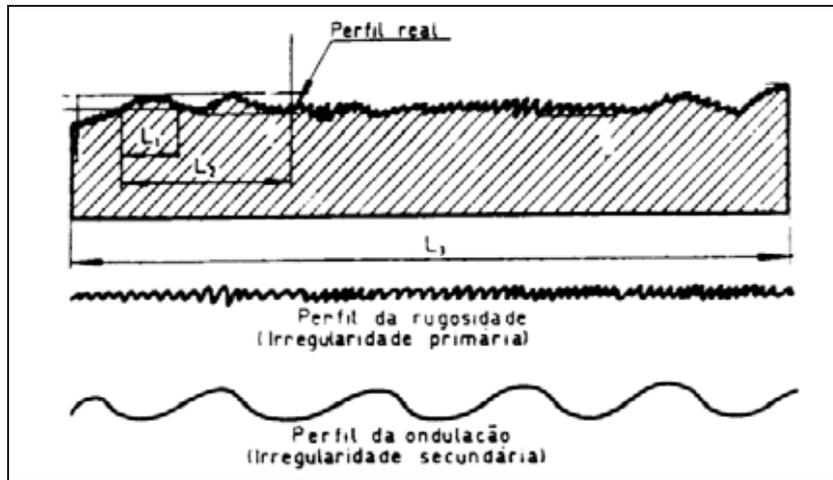


Figura 14 - Frequência da rugosidade em uma peça (PALMA, 2008).

### 3.2.2. Sistemas de medição da rugosidade superficial

Durante a medição de rugosidade superficial, o rugosímetro percorre trechos específicos e define percurso característicos.

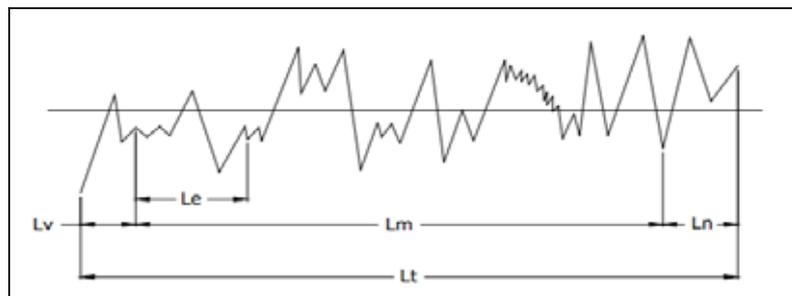


Figura 15 - Trechos no processo de medição da rugosidade (PALMA, 2008).

A Figura 15 apresenta os conceitos de percursos durante o processo de medição de rugosidade. Sendo que o percurso inicial ( $L_v$ ) representa a primeira extensão do trecho projetado sobre a linha média. Este não é usado na avaliação da rugosidade, apenas permite o amortecimento das oscilações mecânicas e elétricas iniciais e centragem do perfil rugosidade.

O percurso de medição ( $L_m$ ) representa o trecho utilizado na medida de rugosidade, projetado sobre a linha média. Percurso final ( $L_n$ ), não é usado na avaliação do perfil rugosidade, usado apenas para amortecer oscilações mecânicas e elétricas finais. E o percurso de apalpamento ( $L_t$ ) é o percurso como um todo, sendo a soma dos percursos inicial de medição e final,  $L_t=L_v+L_m+L_n$ . O comprimento de amostragem ( $L_e$ ): seria o quinto percurso de medição,  $L_e=L_m/5$ . Deve conter todos os elementos representativos de rugosidade (PALMA, 2008).

### 3.2.3. Parâmetros de avaliação da rugosidade

#### 3.2.3.1. Rugosidade média ( $R_a$ )

É a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos afastamentos dos pontos do perfil de rugosidade, em relação a linha média, dentro do percurso de medição  $L_m$  e  $R_a$ , calculado pela equação (7 e 8), ou seja a distância média de um perfil, desde sua linha média, sobre um comprimento medido. Matematicamente expressado por:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx = \frac{A}{L} \quad \text{equação (7)}$$

Ou

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y| \quad \text{equação (8)}$$

Onde  $n$  é o número de ordenadas consideradas.

O parâmetro  $R_a$  é representa uma média, em determinados casos utiliza-se outros parâmetros de rugosidade, uma desvantagem deste método é de não caracterizar a variabilidade de diferentes locais da rugosidade analisados (DIAS, 1980).

### 3.2.4. Outros parâmetros de avaliação da rugosidade

#### 3.2.4.1. Desvio médio quadrático (Rq)

É um parâmetro relacionado ao Ra, denominado RMS (*Root Mean Square*), definido pela equação (9). RMS definido como a distância do pico mais alto ao pico mais baixo, dentro de um perfil medido de rugosidade (DIAS, 1980).

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2 dx} \approx \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n}} \quad \text{equação (9)}$$

A elevação ao quadrado aumenta o efeito das irregularidades que se afastam da média. Ra ou Rq. É ideal para superfícies porosas (PALMAS, 2012).

Como o Ra, o Rq traz vantagens e desvantagem, ele indica a distancia máxima de picos e vales porém como exemplo o pico mais alto pode estar no começo da medição e o mais vale mais baixo no final, o que pode gerar dados erroneos (SHEN, 2003).

#### 3.2.4.2. Rugosidade (Rz)

Outro parâmetro importante é o Rz, o qual analisa os cinco pontos mais altos dos picos e os cinco pontos mais baixos de vale, dentro do comprimento medido (DIAS,1980).

$$Rz = \frac{1}{5} (\sum_{i=1}^5 p + \sum_{i=1}^5 v) \quad \text{equação (10)}$$

Com isso os parâmetros Ry e Rz possibilitam uma idéia mais clara da rugosidade superficial de um material.

### **3.2.4.3. Influência do lixamento na rugosidade**

A rugosidade do material, após o processo de lixamento, varia de acordo com: a pressão da lixa exercida sobre a peça; velocidade de trabalho da lixa; tipo de grão abrasivo; tipo de material da amostra e desenho da lixa (INFORMATIVO TÉCNICO, 2012). É necessário que um padrão de lixamento seja estabelecido, para que não haja uma coleta errada de dados. Podem-se utilizar lixadeiras automáticas para tais fins ou, caso seja feito um lixamento manual, o mesmo deve ser realizado pelo mesmo operador em todos os materiais analisados, evitando assim erros.

## **3.3. Planejamento de experimentos**

Segundo Montgomery (2004), os métodos de controle estatísticos do processo e planejamento de experimentos, são duas ferramentas importante para melhoria e otimização dos processos. O CEP nos fornece informações suficientes para determinar os pontos que necessitam de mudanças úteis. Caso o processo esteja sobre controle, pode não trazer informações úteis. O planejamento de experimentos já é um método estatístico que realizar uma série de ajuste do processo, fazendo mudanças na entrada e na saída, com qual podemos melhorar o processo como um todo.

O planejamento de experimentos é uma ferramenta de engenharia criticamente importante para melhoraria do processo.

### **3.3.1. Diretrizes para o planejamento de experimentos**

O projeto para elaboração de um experimento segundo Montgomery (1997) Werkema e Aguiar (1996a) está esquematizado na Figura 16, abaixo:



Figura 16 - Sistematização de projeto de experimento.[Adaptado de Montgomery 1997].

De posse dos parâmetros envolvidos, pode-se determinar um plano de ação, onde são identificados os pontos que necessitam de mudanças. As etapas para elaboração do experimento são descritos na seguinte ordem:

**1° Reconhecimento e relato do problema:** a identificação do problema está diretamente relacionada com o objetivo estudado. Os objetivos devem ser específicos, mensuráveis e de impacto prático;

**2° Escolha dos fatores e dos níveis:** devem ser levados em conta o intervalo de fatores que irão variar, e os níveis específicos em cada rodada. Quando o objetivo é observar qual fator é importante, em geral é melhor manter baixo o número de fatores;

**3° Seleção da variável resposta:** em geral, a média e o desvio padrão da característica medida, será a variável resposta analisada;

**4° Escolha do planejamento experimental:** a escolha envolve tamanho da amostra (número de réplicas), seleção de ordem adequada de rodadas para tentativas experimentais, ou se a formação de blocos ou outras restrições de aleatorização estão envolvidas;

**5° Realização do experimento:** realizar de maneira correta seguindo o planejado, monitorando todo o experimento, a fim de evitar erros tendenciosos que gerem descarte dos dados obtidos;

**6° Análise dos dados:** Com os dados obtidos, através de métodos estatísticos é possível fazer uma análise, de modo que os resultados e as conclusões sejam objetivos;

**7° Conclusão:** uma vez analisados os dados, o experimento deve acarretar conclusões práticas sobre os resultados e recomendar um curso de ação para promover melhorias (GOMES, 2007).

O projeto experimental deve ser selecionado adequadamente, conduzido com sucesso, os dados analisados corretamente e os resultados devem ser reportados eficientemente.

Além da necessidade de seguir um roteiro é importante em um planejamento de experimentos terem alguns princípios básicos, como elaboração, implementação e análise. Segundo Montgomery (2001), os três princípios básicos de um projeto são: replicação, aleatorização e blocagem. Para melhor compreensão, a seguir são explicitados a definição dos itens.

**Replicação:** é a repetição do experimento. Permite ao experimentador obter estimativa do erro, e quando usado à média pra estimar o efeito de um fator, a replicação permite ter uma estimativa mais precisa (MONTGOMERY, 2001).

**Aleatorização:** é o processo de definir a ordem do tratamento da matriz, através de sorteios ou limitações (GALDAMÉZ, 2002).

**Blocagem:** avalia a variabilidade produzida pelos fatores perturbadores do experimento. (GALDAMÉZ, 2002).

A escolha do processo estatístico dependerá entre de fatores, como custo envolvido no projeto.

### 3.3.2. Planejamento fatorial

O planejamento fatorial é a ferramenta estatística mais indicada quando se deseja estudar os efeitos de duas ou mais variáveis de influência, sendo que em cada réplica, todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável são investigadas (BARROS NETO et al.,1996). De acordo com equação 11.

Este tipo de planejamento é representado por:

$$b^k \quad \text{equação(11)}$$

onde b: número de níveis

k: número de fatores

O caso mais simples é quando usamos  $b=2$ , onde k está presente em apenas 2 níveis. No planejamento fatorial, os níveis são geralmente codificados com os sinais (+) e (-), atribuídos arbitrariamente. Cabe ressaltar que no planejamento experimental, as réplicas ou repetições do experimento são de fundamental importância e servem para determinar o erro no experimento.

#### 3.3.2.1. Vantagens no uso do planejamento experimental

Destacam-se as seguintes vantagens (BUTTON, 2005):

- Redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade da informação;
- Estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos;
- Determinação da confiabilidade dos resultados;
- Realização da pesquisa em etapas, num processo iterativo de acréscimo de novos ensaios;

- Seleção das variáveis que influenciam um processo com número reduzido de ensaios;
- Representação do processo estudado através de expressões matemáticas;
- Elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos.

### 3.3.3. Planejamento Fatorial $2^k$

O processo experimental neste caso consiste em realizar teste com cada uma das combinações da matriz, para depois interpretar os efeitos principais e interações, assim podemos observar o melhor processo a ser utilizado.

Como exemplo, faremos uso de um modelo onde existem 3 fatores (X1, X2, X3), com dois níveis (+1) e (-1).

Assim, temos uma matriz de experimentos fatorial com  $2^3$  fatores, demonstrado no Quadro 2, sendo a resposta colocada na coluna  $y_i$ .

Quadro 2 - Matriz de planejamento do experimento  $2^3$ .

N Teste	Fatores de controle			Ordem de teste	Resposta ( $y_i$ )
	X1	X2	X3		
1	-1	-1	-1	6	$y_1$
2	+1	-1	-1	8	$y_2$
3	-1	+1	-1	1	$y_3$
4	+1	+1	-1	2	$y_4$
5	-1	-1	+1	5	$y_5$
6	+1	-1	+1	3	$y_6$
7	-1	+1	+1	4	$y_7$
8	+1	+1	+1	7	$y_8$

No Quadro 2, as colunas representam os fatores investigados ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ) e as linhas representam os diferentes níveis ou as combinações dos fatores (+1 e -1).

Esse modelo garante que todas as colunas sejam ortogonais entre si, e podemos definir os efeitos principais e de interação que as variáveis independentes produzem na resposta (GALDAMEZ, 2001).

Segundo Montgomery (2001), o modelo estatístico do experimento fatorial  $2^3$  é dado pela equação (12).

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta_{ij}) + (\tau\gamma_{ik}) + (\beta\gamma_{jk}) + (\tau\beta\gamma_{ijk}) + \varepsilon_{ijk}$$

equação (12)

Onde:

$\mu$  é a média dos resultados,

$\tau_i$  é o efeito principal do fator  $x_1$ ,

$\beta_j$  é o efeito principal do fator  $x_2$ ,

$\gamma_k$  é o efeito principal do fator  $x_3$ ,

$(\tau\beta_{ij})$  é o efeito da interação entre os fatores  $x_1$  e  $x_2$ ,

$(\tau\gamma_{ik})$  é o efeito da interação entre os fatores  $x_1$  e  $x_3$ ,

$(\beta\gamma_{jk})$  é o efeito da interação entre os fatores  $x_2$  e  $x_3$ ,

$(\tau\beta\gamma_{ijk})$  é o efeito da interação entre os fatores  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ ,

$\varepsilon_{ijk}$  é o erro experimental.

### 3.4. Análise de variância

A análise de variância (*ANOVA-Analysis of Variance*) é uma das principais ferramentas estatísticas para a análise de dados, utilizada para decompor a variabilidade total

em componentes de variabilidade, atribuídos a determinadas fontes de variação, com o objetivo de comparar as médias dos resultados associados às fontes de variação através do teste de hipóteses (MILTON; ARNOLD, 1995).

O objetivo da *ANOVA* é testar o efeito de cada fator (A ou B) ou a interação entre eles. Ao analisar projetos fatoriais com mais de dois fatores, utiliza-se análise de variância para  $k$  fatores, seguindo o modelo estatístico mostrado a seguir (BOMBARDO, 2004).

### 3.4.1. Tabela ANOVA

A análise estatística dos projetos fatoriais com dois fatores e com efeitos fixos é feita através da análise de variância (ANOVA) para dois fatores.

O mostra dados típicos de experimento fatorial com dois fatores. Os fatores são representados por A e B, os níveis dos fatores por  $a$  e  $b$ , sendo  $n$  o número de repetições do experimento.

Fator A                    a níveis;

Fator B                    b níveis;

Fator C                    c níveis;

O número total de observações é:

$N = a \times b \times c \times \dots \times n$  (realizados aleatoriamente)

É a resposta dada por  $(y_{ijk})$ , quando observado fator A na  $i$ -ésimo nível ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). A tabela ANOVA para projetos cruzados de três fatores é representada no Quadro 3.

Quadro 3 - Dados típicos de experimentos fatoriais com 2 fatores.

		Fator B			
		1	2	...	B
Fator A	1	$Y_{111}, Y_{112}, \dots, Y_{11n}$	$Y_{121}, Y_{122}, \dots, Y_{12n}$	...	$Y_{1b1}, Y_{1b2}, \dots, Y_{1bn}$
	2	$Y_{211}, Y_{212}, \dots, Y_{21n}$	$Y_{221}, Y_{222}, \dots, Y_{22n}$	...	$Y_{2b1}, Y_{2b2}, \dots, Y_{2bn}$
	...	...	...	...	...
	nn	$Y_{n11}, Y_{n12}, \dots, Y_{n1n}$	$Y_{n21}, Y_{n22}, \dots, Y_{n2n}$	...	$Y_{nb1}, Y_{nb2}, \dots, Y_{nbn}$

Fonte: adaptado de Werkema & Aguiar (1996).

Com este modelo é possível verificar se a resposta muda o fator A, o fator B ou a interação entre os fatores (linha x coluna).

Existe também um modelo estatístico para o planejamento de experimentos, definido pela equação 13 a seguir.

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \text{equação(13)}$$

Onde:

$\mu$  é a média dos resultados,

$\tau_i$  é o efeito principal do fator A,

$\beta_j$  é o efeito principal do fator B,

$(\tau\beta)_{ij}$  é o efeito da interação entre os fatores A e B,

$\varepsilon_{ijk}$  é o erro experimental.

Um método para determinar os coeficientes da equação 13 é fazendo o uso da ANOVA, que também verifica se estes efeitos são significativos na variável resposta. Para determina qual fator é influente, analisamos o valor do Teste F, se este for maior que o valor do nível de significância, significa que o efeito é significativo.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Material

O material empregado possui composição definida em função da sua aplicabilidade em esferas de armazenamento de gás sujeita a H<sub>2</sub>S e Hidrogênio. O bloco proveniente da Tenaris Confab, fabricado em aço ASTM 516 Gr 70, fundido em tarugo e laminado, possui dimensões de 300 mm x 150 mm x 60 mm. A peça foi soldada com eletrodo revestido tendo largura máxima de 40mm. A partir dessa, foram seccionadas quinze corpos de prova de dimensões 100 mm x 30 mm x 60 mm, sendo cinco com solda e dez sem solda (somente metal de base) – Figura 17. Na Figura 17 abaixo, é mostrado 1/5 da largura do bloco inteiro. A cada 30 mm, são feitos 3 cdp's - a peça inteira está exemplificada na Figura 17.

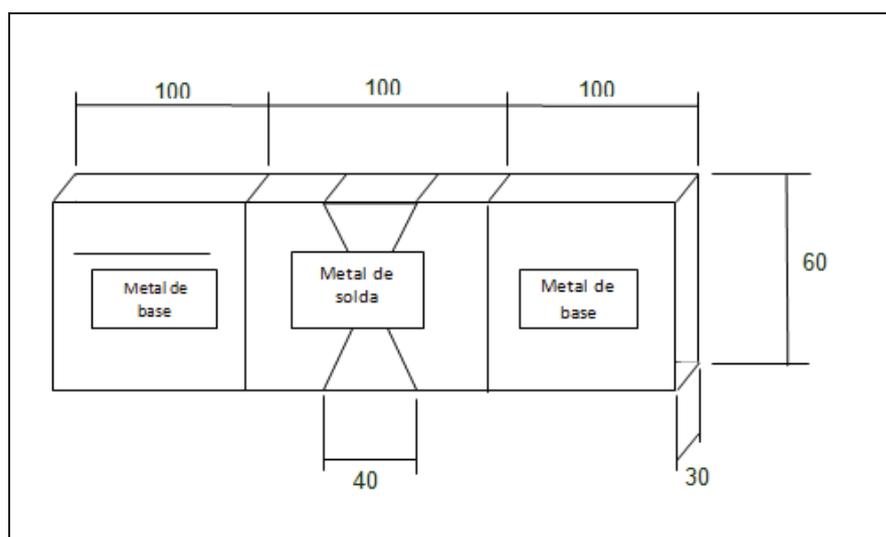


Figura 17 - Dimensões do bloco e de cada cdp (MB e MS).

### 4.2. Métodos

As peças seccionadas foram inicialmente analisadas por meio de um espectrômetro móvel de emissão óptica da marca SPECTRO, modelo Spectrotest TXC03 (Figura 18) e verificadas quanto à homogeneidade e concordância com as especificações do aço ASTM 516

Gr 70. Após análise das composições de cada peça, foi escolhido o corpo de prova de número onze (Figura 19).



Figura 18 - Espectrômetro móvel de emissão óptica SPECTRO TXC03.

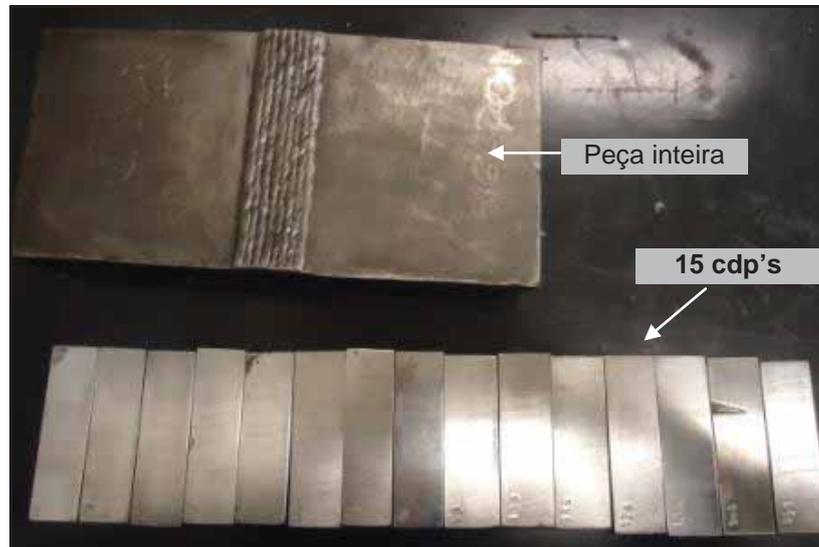


Figura 19 - Peça inteira e os 15 corpos de prova seccionados.

Para preparação da superfície da peça, foi utilizado lixas d'água da marca NORTON 227T e lixamento com as granulometrias na seguinte ordem – 60, 80, 100, 280, 320, 400, 600 e 1200. A amostra foi lixada com retífica pneumática marca Blue Point modelo AT401 (Figura 20) em movimentos circulares, tomando o cuidado de abranger toda a peça evitando

possíveis abaulamentos. Após a preparação do cdp, foi feito um ataque com Nital 10% para auxiliar na verificação de possíveis impurezas e inclusões na peça, como pode ser visto na Figura 21.



Figura 20 - Retífica pneumática Prep Tool Blue Point AT401.



Figura 21 - Corpo de prova 11 Nital 10% e lixamento até 1200 - segregações de impurezas na parte central da peça.

A dureza foi medida por meio de um durômetro portátil por método UCI marca GE e modelo MIC 10 utilizado conjuntamente um suporte micrométrico da marca Krautkramer (Figura 23). O suporte possui a função de proporcionar medidas perpendiculares a superfície (condição primordial para medidas confiáveis no equipamento), evitando desta forma influência do operador. A sonda utilizada foi de 5kgf com indentador Vickers de ponta de

diamante. A peça foi colocada sobre uma base, e para evitar deslocamento, utilizando o detergente como acoplante entre o cdp e a base.



Figura 22 - Equipamento MIC 10, sonda e suporte micrométrico [ figura retirada do Application Guide Portable Testers – GE Inspection Technologies].



Figura 23 - Ensaio de dureza com durômetro portátil MIC 10.

Primeiramente foram feitas 54 medidas visando analisar o perfil de dureza da peça. Essa análise teve o objetivo de verificar as influências da laminação, taxa de resfriamento e impurezas do corpo de prova. Foram feitas 4 retas com 54 medidas e distanciamento de 10 mm entre elas, como mostra o esquematização na Figura 23.

Após essa análise, foi determinada a extensão onde não havia influência da laminação e da segregação de impurezas. Delimitada essa faixa, seguiram-se as medidas de dureza em duas linhas (1 e 6). Essas foram feitas em linha reta, sendo no total 2 linhas e cada uma com 10 indentações. A distância entre indentações foi de 5 mm e o espaçamento entre as linhas está mostrado a seguir:

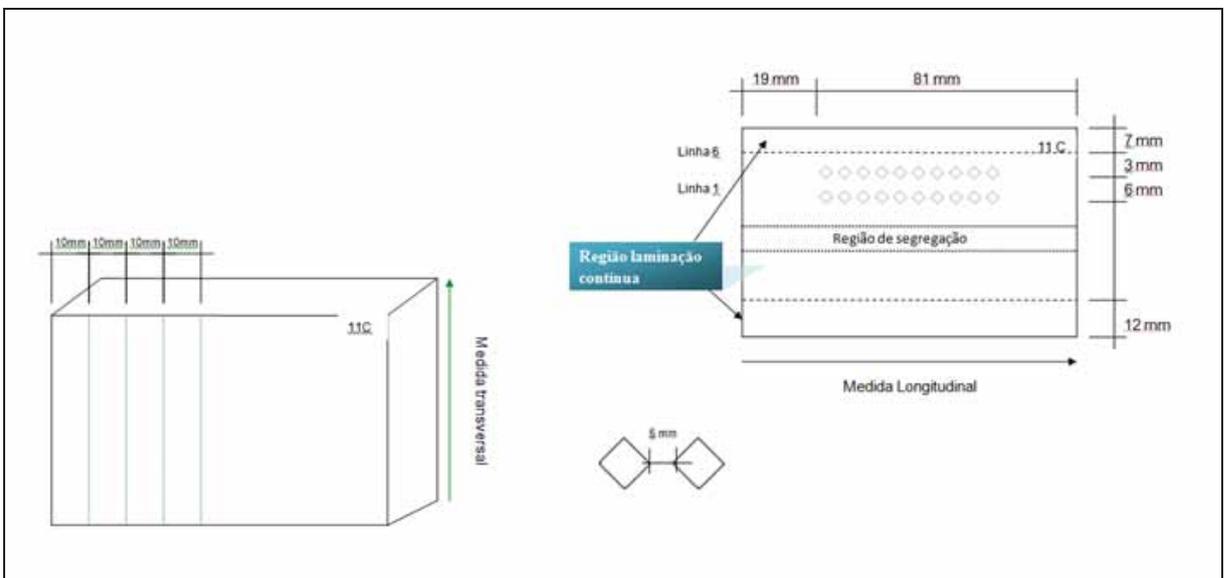


Figura 24 - Ilustração da coleta dados no cdp.

Tal procedimento de medição foi feito duas vezes – a primeira para a superfície com acabamento final com lixa 1200 e depois, seguindo a mesma metodologia mostrada acima, para acabamento com lixa 80, de acordo com a Figura 24.

Após as medições de dureza para as diferentes granulometrias (80 e 1200), essas foram analisadas estatisticamente por meio do delineamento estatístico (DOE) de matriz fatorial completa <sup>22</sup>.

Todos os tratamentos estatísticos e gráficos utilizados no trabalho foram feitos com auxílio do programa Minitab.

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1. Discussões baseadas nas propriedades do material

Os quinze corpos de prova foram analisados quanto a sua composição química e verificados qual possuía menor desvio padrão médio, para deste modo, determinar a peça com maior homogeneidade. Após as análises com espectrômetro de emissão óptica, verificou-se que a peça com menor desvio padrão média foi a de número 11, com 7,90, a composição química pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1 - Análise química do cdp 11.

Composição química	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe	Desvio padrão médio
Média (%)	0,14	0,27	1,08	0,017	0,0035	0,25	0,077	0,16	97,8	<b>7,90</b>

A escolha do material com maior homogeneidade é crucial para o estudo em questão, já que qualquer influência de outras variáveis além das estudadas pode acarretar em conclusões errôneas. Se o material estudado possuir grãos grosseiros, a carga aplicada deve ser o quanto maior, abrangendo maior área durante a indentação e assim, não acarretando em variações muito altas. Devido ao desvio padrão da peça 11 ser pequeno, essa pode ser considerada homogênea e a aplicação de uma carga de 50N não causará grandes desvios.

Para se obter dados representativos por meio do método DOE, deve-se isolar as variáveis a serem estudadas: taxa de resfriamento e rugosidade, das outras que também influenciam na dureza mas que não farão parte do estudo: processamento e segregação de impurezas. Portanto, foi feita a análise do perfil de dureza transversalmente ao sentido que será estudado posteriormente. A Figura 24, gráficos 1 e 2 e Tabela 2 exemplificam o procedimento.

Tabela 2 - Médias do perfil de dureza do cdp 11.

Medidas	1	2	3	4	5	Média total
Distância	0 mm	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	-
Média (HV)	143.04	142.11	142.30	145.76	149.65	<u>143.30</u>
Desvio padrão	5.46	6.77	5.93	7.42	5.02	<u>6.39</u>

As durezas não variaram significativamente ao longo das diferentes distâncias, como pode ser visto no Tabela 2. Tal fato já era esperado, pois os pontos medidos em cada distância estão paralelos entre si e sua microestrutura é similar em cada ponto individual, acarretando desta forma, em pouca variação da dureza ao longo da distância.

Para facilitar a visualização e determinação das várias faixas de dureza, foi feita as médias em cada ponto medido e plotado um novo gráfico. Por meio desse gráfico, foi delimitado as faixas de influência do processamento de laminação à frio e também da segregação de impurezas. Tomando conhecimento que a laminação a frio causa encruamento, ou seja, há um aumento da concentração de discordâncias, acarretando no aumento acentuado da dureza, tal fato pode ser verificado na Figura 25. Pode-se perceber que, entre aproximadamente as medidas 0 a 7, há um aumento significativo da dureza influenciado provavelmente pela laminação a frio. Enquanto que entre 8 a 22, há certa estabilidade dos valores, não havendo influência significativa do processamento em questão na dureza. Há influência da laminação em ambos os lados, no outro extremo, entre as medidas 45 a 55, também se verifica um aumento da dureza.

Outra variável de alta influência na dureza são as impurezas, as quais se solidificam por último e se concentram no centro da peça. No caso em questão, essas impurezas foram facilmente visualizadas macroscopicamente após ataque com Nital. A segregação de impurezas são extremamente perigosas, já que fragiliza o aço, diminuindo de forma crítica a sua dureza e tenacidade. Essa diminuição da dureza pode ser visualizada nos Figura 25 e Figura 26 abaixo. A parte central se torna mais frágil, com alta instabilidade nos valores e menor dureza. Em média, as medidas entre 23 a 34 é aproximadamente a faixa onde ocorreu a segregação de impurezas.

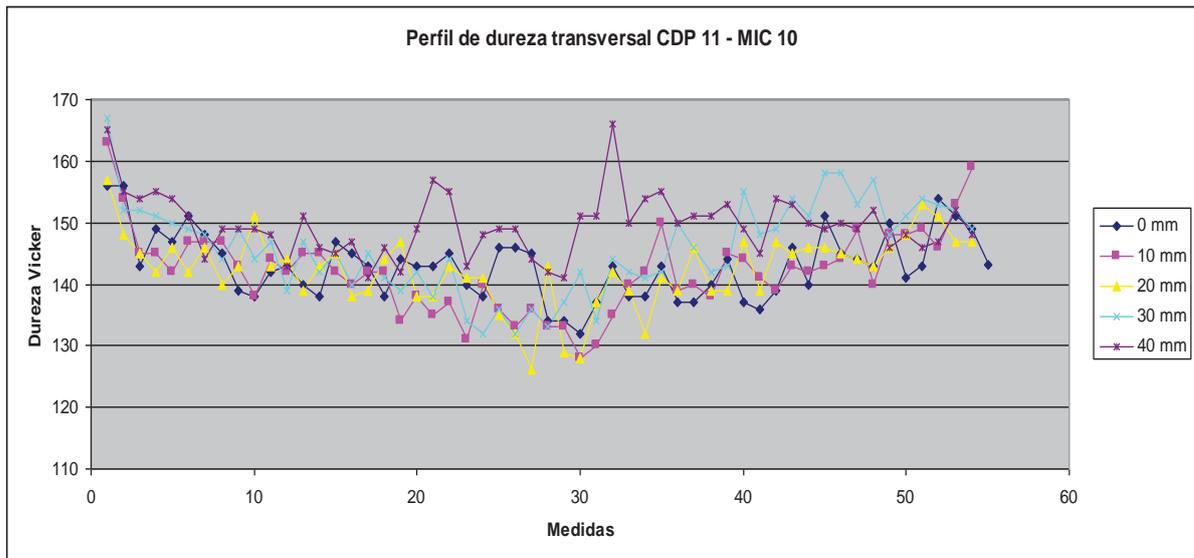


Figura 25 – Perfil de dureza transversal CDP 11 (todas as distâncias).

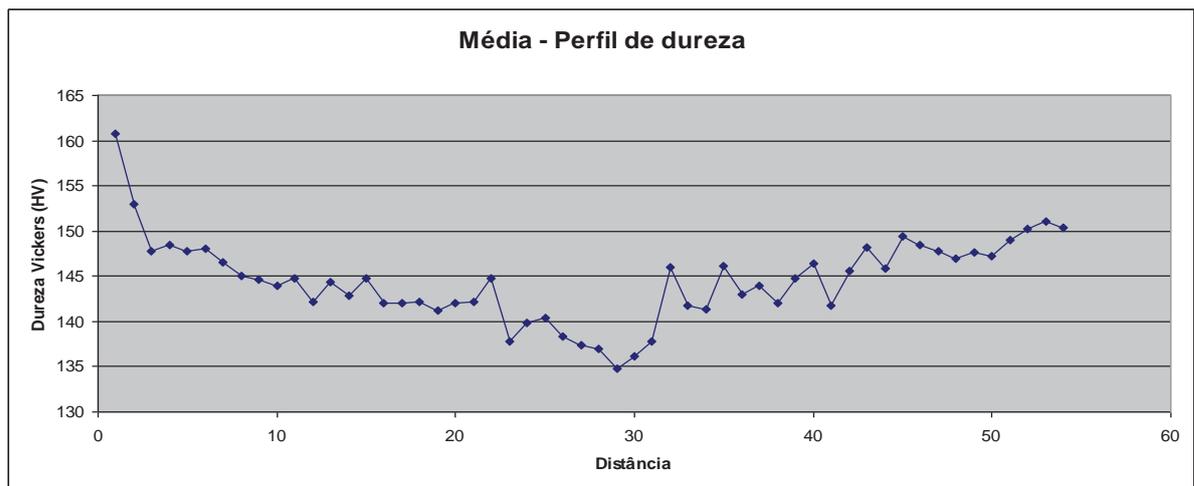


Figura 26 – Perfil de dureza transversal CDP 11 (Médias das distâncias).

Foi preferível fazer as medidas na parte superior da peça, já que a faixa de influência da laminação é menor, havendo mais espaço para fazer as medidas. Partindo dessas premissas, a medida da linha 1 foi feita a 10 mm do extremo superior da peça e a linha 6 a uma distância de 16 mm do extremo superior da peça. Deste modo, as medidas foram realizadas em uma área onde possivelmente não há influência das principais variáveis que mais influenciam a dureza na peça. As medidas de dureza nas linhas 1 e 6 estão na Tabela 3 abaixo:

Tabela 3 - Valores de dureza longitudinal CDP 11 - Com lixas 80 e 1200

Medidas	Exp4	Exp1	Exp2	Exp3
Linha	Linha 1		Linha 6	
Iteração	1200xlin1	80xlin1	1200xlin6	80xlin6
1	155	155	149	155
2	146	154	158	159
3	144	164	147	156
4	154	164	146	154
5	167	169	153	154
6	169	156	156	163
7	162	153	148	150
8	156	159	147	148
9	154	147	153	157
10	151	151	154	160
<b>Média</b>	<b>155,80</b>	<b>157,20</b>	<b>151,10</b>	<b>155,60</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>8,19</b>	<b>6,76</b>	<b>4,23</b>	<b>4,50</b>

Pela Tabela 3 e Figura 27 pode-se perceber que na linha 1 há maior variação da dureza. Esse fato pode ser devido a sua maior proximidade da zona de segregação de impurezas. Além disso, possíveis abaulamentos durante o processo de lixamento com a retífica, pode também ter sido uma das causas dessa variação.

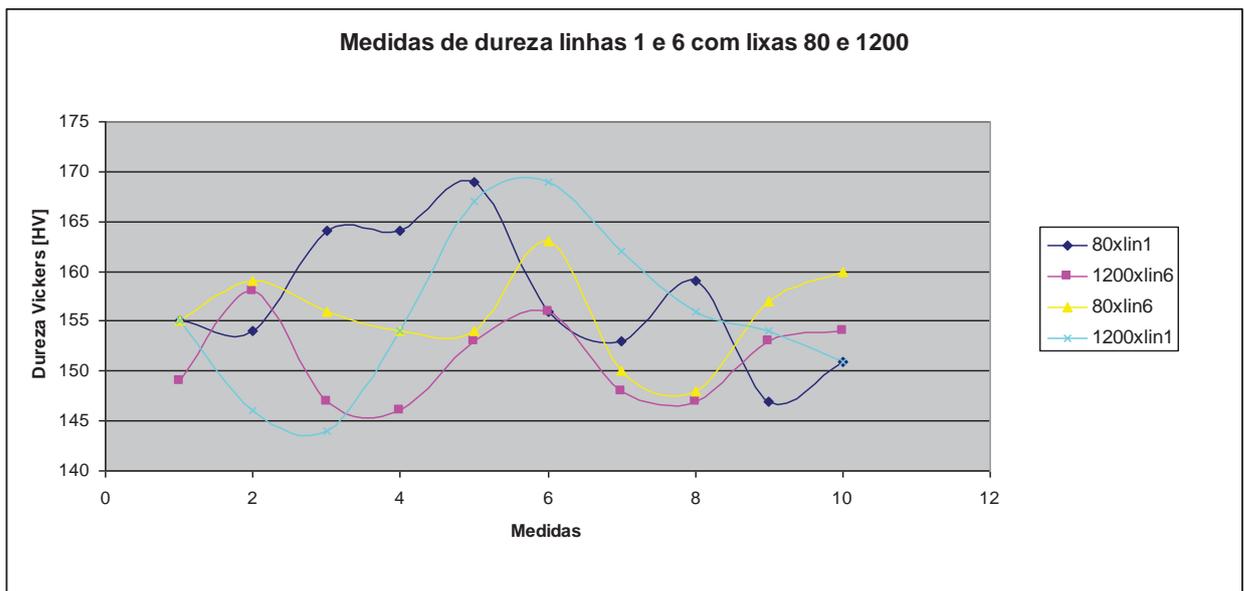


Figura 27 - Medidas de dureza nas linhas 1 e 6 em função do lixamento com granulometria de 80 e 1200.

Pela comparação entre lixas 80 e 1200 para as linhas 1 e 6 , pode-se perceber que apesar de haver variação entre as lixas essa não é significativa. Pelos gráficos 5 e 6 , isso fica mais evidenciado, pois as variações máximas e mínimas das lixas 80 ficam dentro da faixa de valores da lixa 1200 e vice versa. Tal fato será explorado mais adiante com auxílio do delineamento estatístico DOE.

Quanto aos valores médios de dureza para ambas as linhas, para a granulometria de 80 os valores foram maiores do que a de 1200. Como a rugosidade é muito maior para grãos de 80um, haverá “picos” e “vales” acentuados na superfície. Portanto, durante a medida, possivelmente as indentações ocorreram na maior parte nos “picos” da superfície, acarretando em indentações menores. Como a medida de dureza é dependente do tamanho da área indentada, ou seja, quanto mais duro for o material, menor será a área indentada e consequentemente o valor de dureza será maior. De acordo com a Figura 28 e Figura 29.

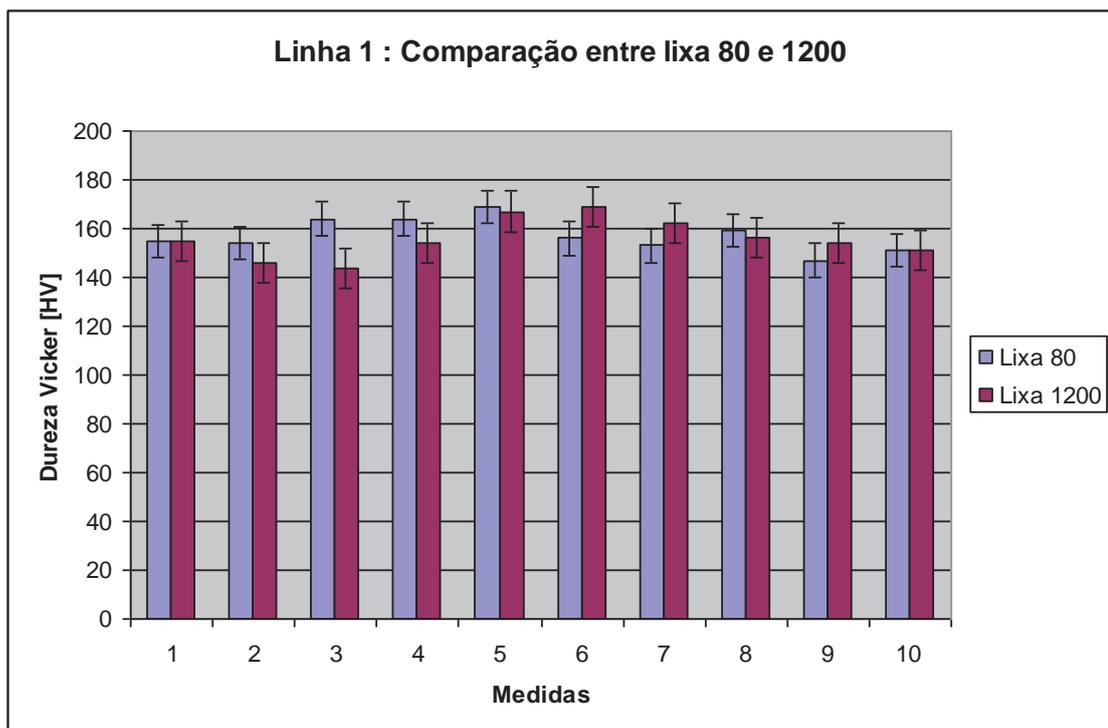


Figura 28 - Comparação entre lixa 80 e 1200 - Linha 1.

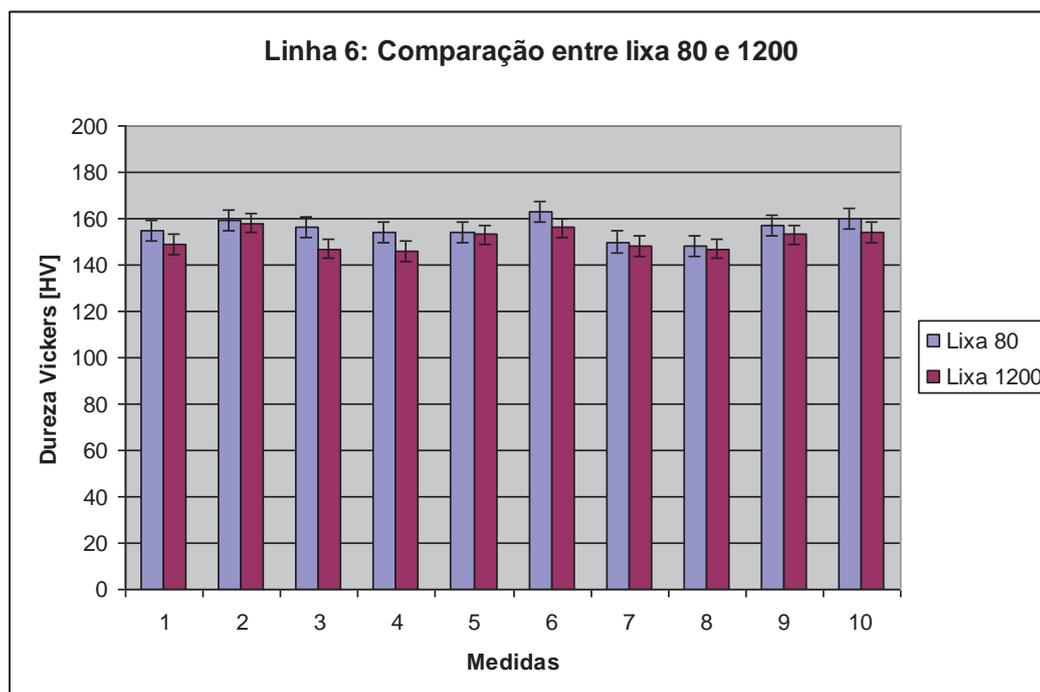


Figura 29 - Comparação entre lixa 80 e 1200 - Linha 6

## 5.2. Discussões baseadas em tratamento estatístico

Para realização do método de planejamento de experimentos (DOE), foi utilizado o software estatístico Minitab 16, onde foi obtido resultados quanto à influência dos fatores de Dureza e Resfriamento. Foi montada a tabela com os fatores e os níveis, onde (-1) representa a lixa 80 e linha 1, e o sinal (+1) lixa 1200 e linha 6. A escolha do sinal negativo para lixa 80 e linha 1, foi devido à primeira ter a menor granulometria e a segunda por ter a menor dureza (devido a segregação de impurezas) em comparação à linha 6. Já para o sinal positivo (+1) o mesmo é válido, ou seja, a lixa 1200 por ser a de maior granulometria e a linha 6 por ter maior dureza.

A montagem da tabela foi realizada utilizando uma matriz fatorial completa  $2^2$ , onde se pode testar 2 fatores em 2 níveis de ajuste. Neste caso, foram executadas 10 réplicas para cada condição experimental, conforme apresentado na Tabela 4.

Pela Tabela 4 é possível observar que a cada 4 medidas realizadas representa-se uma réplica, ou seja, do experimento 1 ao 4 como sendo a primeira réplica, do 5 ao 8 a segunda

réplica, e assim por diante. Nesta tabela também aparecem os resultados dos erros experimentais (resíduos), que serão analisados posteriormente quanto a sua normalidade e estabilidade.

Tabela 4 - Experimento com  $2^2$  fatorial obtido no Minitab.

Medidas	LIXA	RESFRIAMENTO	DUREZA	Resíduo1
1	-1	-1	155	-2,2
2	1	-1	155	-0,8
3	-1	1	155	-0,6
4	1	1	149	-2,1
5	-1	-1	154	-3,2
6	1	-1	146	-9,8
7	-1	1	159	3,4
8	1	1	158	6,9
9	-1	-1	164	6,8
10	1	-1	144	-11,8
11	-1	1	156	0,4
12	1	1	147	-4,1
13	-1	-1	164	6,8
14	1	-1	154	-1,8
15	-1	1	154	-1,6
16	1	1	146	-5,1
17	-1	-1	169	11,8
18	1	-1	167	11,2
19	-1	1	154	-1,6
20	1	1	153	1,9
21	-1	-1	156	-1,2
22	1	-1	169	13,2
23	-1	1	163	7,4
24	1	1	156	4,9
25	-1	-1	153	-4,2
26	1	-1	162	6,2
27	-1	1	150	-5,6
28	1	1	148	-3,1
29	-1	-1	159	1,8
30	1	-1	156	0,2
31	-1	1	148	-7,6
32	1	1	147	-4,1
33	-1	-1	147	-10,2
34	1	-1	154	-1,8
35	-1	1	157	1,4
36	1	1	153	1,9
37	-1	-1	151	-6,2

Tabela 5 - Experimento com 2<sup>2</sup> fatorial obtido no Minitab.

Medidas	LIXA	RESFRIAMENTO	DUREZA	Resíduo1
38	1	-1	151	-4,8
39	-1	1	160	4,4
40	1	1	154	2,9

Para verificar quais fatores influenciam na dureza, foi feito um gráfico de Efeito de interação, como mostra na Figura 30.

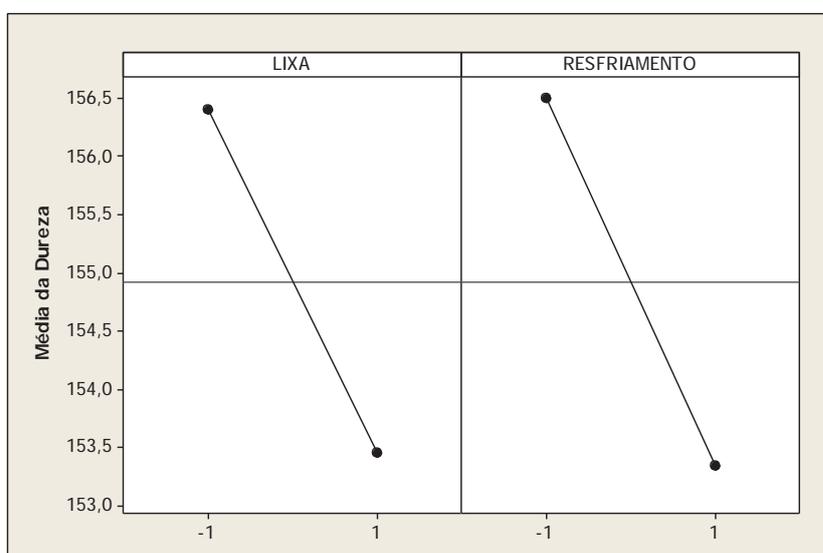


Figura 30 - Efeitos dos fatores sobre a média da resposta (Dureza).

A Figura 30 apresenta o efeito da variação média das respostas em mudança no nível lixa 80 e linha 1 (-1) e lixa 1200 e linha 6 (+1). É possível observar que quando se muda de Lixa 80 (-1) para a lixa 1200 (+1), a dureza diminui. O mesmo ocorre com o fator resfriamento, que com a mudança do nível (-1) para o nível (1) provoca diminuição da dureza.

A partir da análise da Figura 30, também é possível verificar que o fator lixa, quando é ajustado no nível baixo (-1), há um aumento na dureza em relação ao nível alto (+1). Tal fato já foi discutido anteriormente, sendo esse aumento causado provavelmente devido à indentações feitas nos “picos” da superfície, diminuindo a área indentada e causando valores maiores que na lixa 1200, que não possui tanta irregularidade na superficial. A mesma análise pode ser feita para o resfriamento, no nível baixo (-1), a dureza média foi maior do que para a nível alto (+1).

Como as medidas do resfriamento nível baixo (-1) e nível alto (+1) foram muito próximas, provavelmente esse fator foi decisivo para a não influência do Resfriamento nos valores de dureza do material. Já no caso do Lixamento, o resultado não foi o esperado, pois a lixa 80 não influencia na dureza, fato que contradiz a norma ASTM . Na norma ASTM A1038 – 10a, diz que a superfície do material deve estar limpa e com melhor acabamento superficial possível. No caso de uma carga de 50 N (carga utilizada no experimento), a rugosidade  $R_a$  deve ser igual ou menor que  $0,10\mu\text{m}$ . Ou seja, um lixamento com alto grau de acabamento com lixamento até 1200 para dar valores confiáveis. Devido à norma, para a um lixamento com 80, deveria ter dado um influência dessa lixa na medida da dureza. Porém, foi realizado uma análise da rugosidade da peça para as lixas 1200 e 80 e foi constatado que, para a lixa 1200 o  $R_a$  foi de  $0,1021\mu\text{m}$  e para a lixa 80, foi de  $1,092\mu\text{m}$ . Então para a lixa 1200, a rugosidade está dentro do permitido, já para a 80, sua rugosidade está menor do que deveria. Portanto, a menor rugosidade pode ter sido um dos fatores que fizeram com que a lixa não fosse um efeito de influência nas medidas. Essa menor rugosidade pode ser devido ao lixamento ter sido com retífica, já que esse causa um lixamento de maior grau de polimento do que o lixamento manual, pois a lixa fica “gasta” mais rápida.

Na Figura 31 é apresentado o gráfico de Pareto, que mostra graficamente a grandeza dos efeitos dos fatores. Para a análise de significância dos fatores foi utilizada estatística *T-Student*, que é baseada em cálculo de valores de “T” para cada um dos fatores estudados em comparação com o valor de “T” crítico encontrado na tabela T-Student “ANEXO”. Todas as vezes que o valor de “T” do fator superar o valor crítico tabelado considera-se o fator influente. Neste caso, conforme mostrado na Figura 31, nenhum dos fatores poderá ser considerado influente.

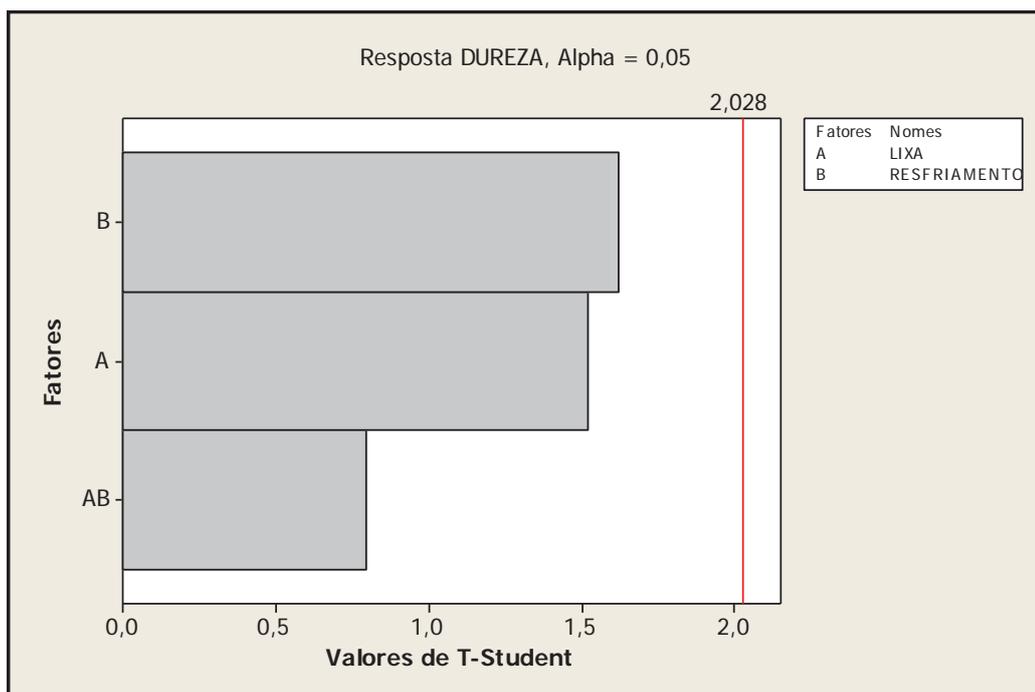


Figura 31 - Gráfico de Pareto, com os fatores influentes.

Segundo é recomendada a utilização da análise de variância (ANOVA), conforme mostrado na tabela y, para determinar numericamente a influencia dos efeitos principais e de interação.

Conforme Tabela 5, de análise de variância, para um nível de confiança de 95%, correspondente a uma significância de 5%, para todos os valores onde “P” forem menores que 0,05 os fatores poderão ser considerados influentes. Neste caso, pode-se observar que nenhum fator e interação é influente.

Tabela 5 - Análise de variância da Dureza.

Termos	Efeito	Coefficiente	T	P
Constante		154,925	159,50	0,000
Lixa	-2,950	-1,475	-1,52	0,138
Resfriamento	-3,150	-1,575	-1,62	0,114
Lixa*Resfriamento	-1,550	-0,775	-0,430	0,430

Após confirmar que os fatores lixa e resfriamento não influenciam na dureza, foram realizadas análises estatísticas para verificar a normalidade dos erros experimentais (resíduos).

Conforme apresentado na Figura 32, é possível observar no gráfico da parte superior esquerda, que os resíduos aparecem quando plotados no papel de probabilidade serem lineares. Consequentemente isso também poderá ser verificado no gráfico da parte inferior esquerda, que mostra que a distribuição deste segue uma distribuição normal (Curva de Gauss). Na Figura 32, nos gráficos mostrados na parte superior e inferior é possível perceber a variação dos resíduos ao longo do tempo.

Para uma análise mais confiável, da normalidade dos resíduos conforme figura X, foi calculado utilizando valor de “P”, a significância da normalidade. Se o valor de  $p > 0,05$ , considera-se que os resíduos seguem uma distribuição normal. Neste caso, foi obtido  $p=0,595$ , que indica normalidade dos mesmos.

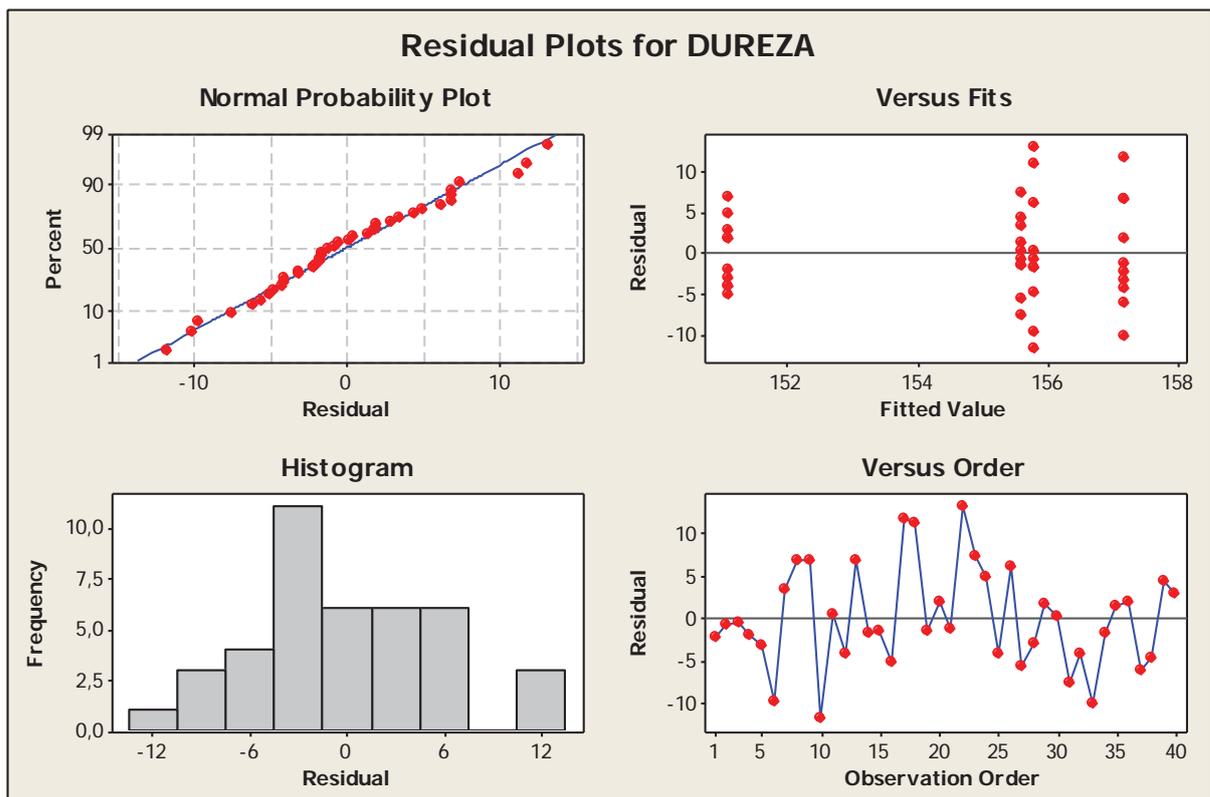


Figura 32 - Análise gráfica do resíduo das medidas de dureza - (a) Gráfico probabilidade normal versus resíduo ; (b) Gráfico de dispersão; (c) Gráfico de histograma e (d) Gráfico ordem de observação versus resíduo.

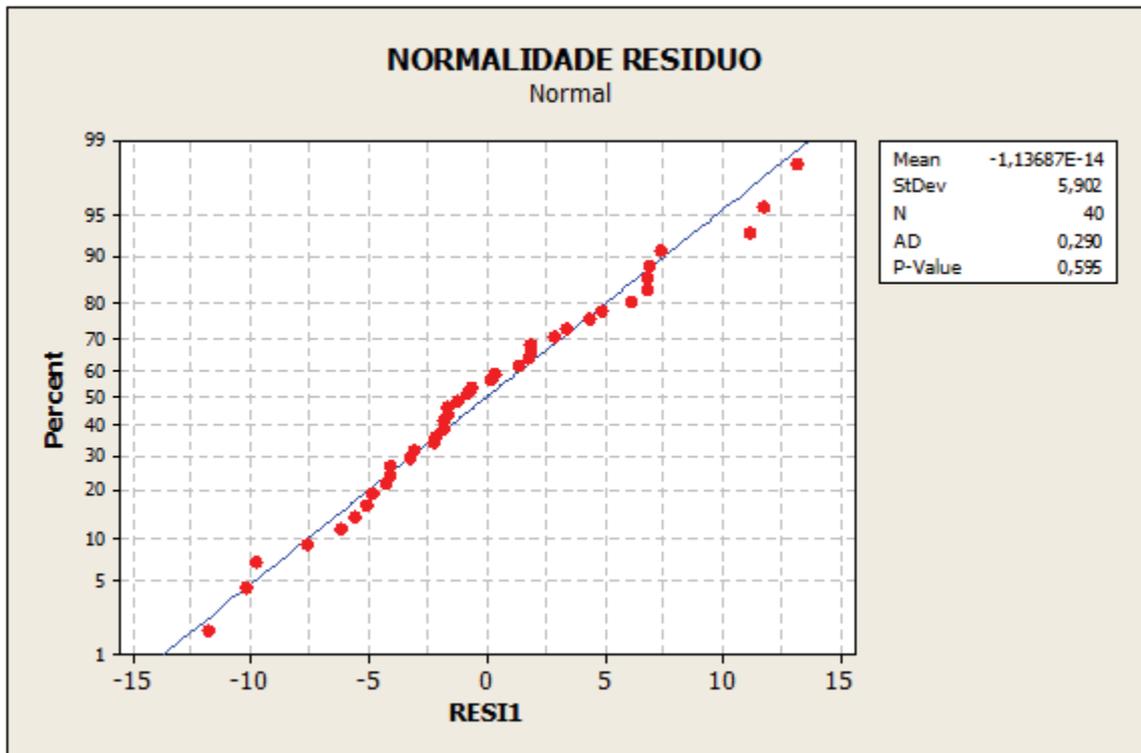


Figura 33 - Gráfico probabilidade normal versus resíduo.

A partir da coleta de dados dos resíduos ao longo do tempo foi possível avaliar a estabilidade do processo através do método Controle Estatístico do Processo (CEP). Conforme mostrado na Figura 34, o processo é estável, pois não apresenta causas especiais de variação. O gráfico escolhido para esta análise foi de valores individuais e amplitude móvel (XRm) devido para cada condição experimental somente ser possível se obter um valor de resíduo.

Pode-se perceber que, tanto nos gráficos de valor individual quanto a de amplitude móvel, a variação não passa do limite superior de controle (LSC) e do limite inferior de controle (LIC), ou seja, os pontos não ultrapassam a região de variação aleatória (causas comuns de variação). Além disso, os pontos estão distribuídos aleatoriamente em torno da linha média ( $\bar{X}$  e MR), não possuindo padrões estranhos como tendências crescentes ou decrescentes, ciclos, estratificação. Portanto, o processo é considerado estatisticamente estável, pois não há evidências da presença de causas especiais de variação (anomalias e causas não previstas).

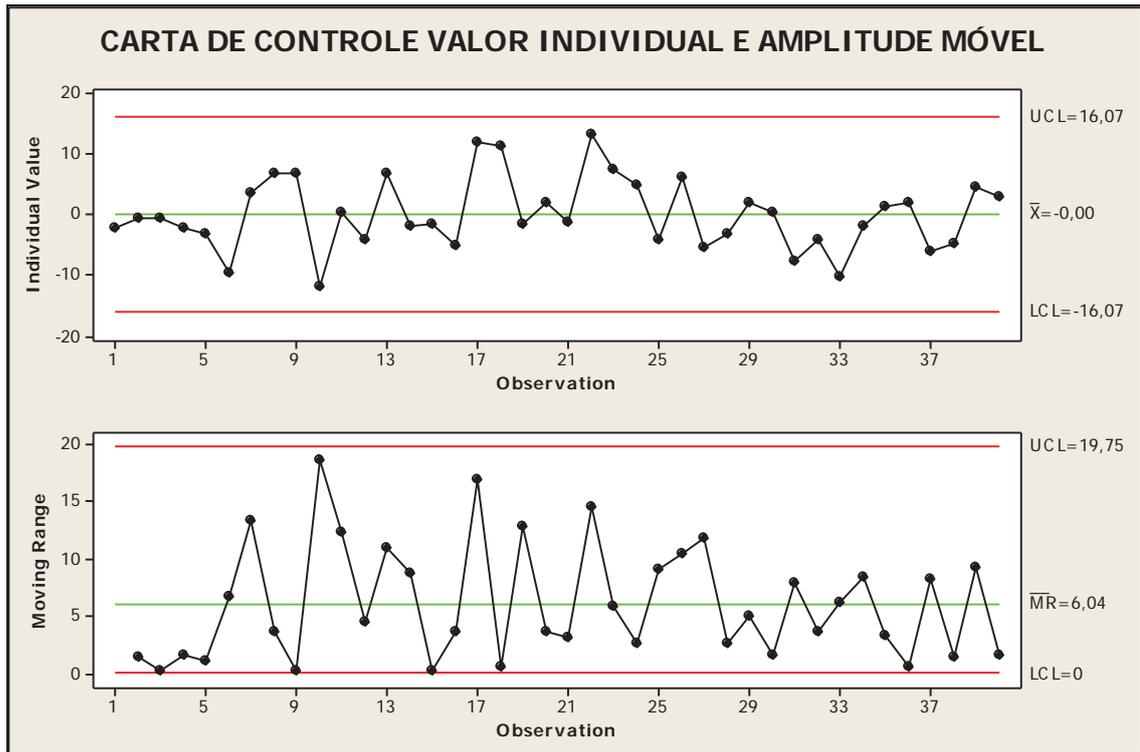


Figura 34 - Carta de controle de valor individual e Amplitude móvel.

## 6. CONCLUSÃO

Com este trabalho foi possível verificar que a propriedade dureza tem valores diferentes em regiões específicas, sendo que em locais com regiões de laminação uniforme, extremos do cdp, apresentam valores maiores de dureza, e a região onde está a segregação de material, parte central, tem dureza menor, fator este influenciado pela taxa de resfriamento do material. Porém quando tomados valores em uma linha contínua, a dureza apresenta valores próximos, pois sua microestrutura é semelhante, com pouca variação de dureza.

Apesar de haver variação da granulometria, este não foi um fator crucial na mudança de dureza. Mesmo com os valores de dureza serem maiores na lixa 80 do que comparado a lixa 1200, deve isso ao fato que a rugosidade da superfície lixada com lixa 80 ser mais alta, com indentações pequenas, com isso o valor de dureza obtido é maior.

Com o auxílio do método estatístico de planejamento de experimentos (DOE), verificou-se que os ensaios foram realizados de maneira satisfatória, visto que houve pouca variação, tal fato é percebido pela análise dos gráficos de carta de controle, normalidade, dispersão e análise residual - sendo todos os gráficos seguindo a normalidade e comprovando, desta forma, que o experimento foi realizado corretamente.

Já a análise de variância comprovou que não há influência do fator Lixa nem do fator Resfriamento, nem da sua interação, o gráfico de Pareto reafirmou o que já havia sido dito. No caso do fator resfriamento, umas das razões deve-se à proximidade das linhas de coleta de dados, o que pode não ter diferenciado o resfriamento.

Porém com relação a influência da Lixa o resultado foi diferente do esperado. Conforme a norma ASTM A1038 – 10a, a lixa 80 deveria ter influência significativa da dureza, mas isso não ocorreu. Tal fato pode ser devido ao lixamento com retífica causar desgaste da lixa muito rapidamente, ocorrendo uma diminuição na granulometria da mesma e causando diminuição da rugosidade da peça.

Conclui-se que, seguindo a linha que o experimento foi realizado de forma correta, a utilização da lixa 80 já é suficiente para que as medidas no durômetro portátil sejam consideradas confiáveis, não sendo realmente necessária a aplicação de lixas de

granulometrias menores e, desta forma, diminui-se o custo e tempo de realização do processo de preparação superficial da peça.

Conclui-se que, seguindo a linha que o experimento foi realizado de forma correta, a utilização da lixa 80 já é suficiente para que as medidas no durômetro portátil sejam consideradas confiáveis, não sendo realmente necessária a aplicação de lixas de granulometrias menores. Na empresa, a recomendação é que seja feito o tratamento superficial até lixa 1200. Ou seja, no processo de tratamento superficial, deve-se utilizar as lixas 80, 100, 280, 320, 400, 600 e 1200. Considerando que um operador experiente consiga fazer o lixamento para cada lixa (com auxílio da retífica pneumática) em torno de 10 minutos, o tempo total gasto será de 1 hora e 10 minutos. Ao se fazer o lixamento somente com a lixa 80, o tempo gasto será de 10 minutos, uma economia de 1 hora, ou seja, uma diminuição em 86% no tempo total gasto nesta metodologia. Sabendo que tempo está diretamente relacionado ao custo, haverá uma redução significativa do mesmo. Além disso, o custo com material será reduzido, pois serão utilizadas menos lixas durante o processo.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASKELAND, D.R. **The Science and Engineering of Materials**. 3. ed. London: Chapman & Hall, 1996. 845 p.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**. 2ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 1996. 299 p.

BOMBARDO, J.L. **Melhoria de processos de fabricação de anéis de centragem de alto-falantes**. 2004. 90 p. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

BUSCHOW, K. H.; CAHN, ROBERT W.; FLEMINGS, M.C.; ILSCHNER B.; KRAMER, E. J.; MAHAJAN, S. **Encyclopedia of Materials - Science and Technology**, v.1-11, Elsevier, 2001.

BUTTON, S. T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados**. 2005. 78 p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Disponível em <<http://www.fem.unicamp.br>>. Acesso em: 15 maio 2007.

CALIL, V. D.S. **Teste de Hipóteses Sobre o Espectro de Frequência, Aplicado na Manutenção Preditiva de Motores de Indução**, 2008. 122 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br>>. Acessado em: 05 nov. 2012.

CASELLA G.; BERGER R. L. **Statistical Inference**. 2. ed. Duxbury: Pacific Grove, 2002. 660 p.

CORREA, S. M. B. B. **Probabilidade e Estatística**, 2. ed. Belo Horizonte: PUC Minas Virtual, 2003.

DIAS, A.M.S.; GODOY, G.C.; MODENESI, P.J. **Análise numérica do ensaio de indentação em materiais com comportamento frágil**. Rio de Janeiro: Scielo Brasil. v. 15 n°1, 2010.

DIAS, S.I.S. **Estudo das superfícies técnicas**, São Paulo: Nobel, 1980. 224 p.

DIETER, G.E., **Mechanical Metallurgy - Metall & Alloys**, London: SI Metric ed., 1988.

FISCHER-CRIPPS, A.C. Critical review of analysis and interpretation of nanoindentation test data. **Surface Coatings and Technology**. Austrália: Elsevier, v. 200. Abril 2006. 4153-4165 p.

FRANK, S.; FULTZ, J. Making hardness tests a moving experience. **Quality**, Troy, United States, Troy, v. 40, n. 8, p. 66-68, 2001.

GALDÁMEZ, E. V. C. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. 2002. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2002.

GEORGE, E. D. **Mechanical Metallurgic**, New York: McGraw-Hill, 1988. 347-348 p.

GOMES, U.R. **Otimização do Processo de Laminação a Frio através de Planejamento de Experimentos**. 2007. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2007.

HERRMANN, K. **Hardness Testing - Principles and Applications**. ASM International, 2011. 95 p.

INFORMATIVO TÉCNICO, **Padrões de Rugosidade no Lixamento**. Disponível em: <<http://www.norton-abrasivos.com.br>>. Acesso em: 22 out.2012.

J. SZILARD, Quicker, simpler hardness testing using ultrasonics, **Ultrasonics**, v.22 n.4, jul. 1984, Pages 174-178.

JASTRZEBSKI, Z.D. **The Nature and Properties of Engineering Materials**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995. 633 p.

KLEESATTEL, C., GLADWELL, G.M.L. The contact - impedance meter-1, **Ultrasonics**, v. 6, n 3, July 1968. 175-180 pp.

MEYERS, M.A.; CHAWLA, K.K. **Mechanical Behavior of Materials**, 2.ed. Cambridge University Press, 2009.

MILTON, J. S.; ARNOLD, J.C. **Introduction to probability and statistics: principles and applications for engineering and the computing sciences**, 3 ed. New York: McGraw-hill, 1995. 811 p.

MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments, 5a edição, New York: John Wiley and Sons, 2001. 680 p.

MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**, 6 ed. New York: John Wiley & Sons, 2004. 660 p.

MONTGOMERY, S.L., Permian Bone Spring Formation: sandstone play in the Delaware Basin, Part II-Basin, United States: **AMERICAN ASSOCIATION OF PETROLEUM GEOLOGISTS BULLETIN**, 1997. v 81, n. 9, 1423-1434 p.

PALMA E. S. Tolerância de Acabamento Superficial-Rugosidade. In:\_\_. **Metrologia**. Belo Horizonte: Puc Minas, 2006. p.110-129. Disponível em: <<http://mea.pucminas.br/palma/metrolapostrugos.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2012.

PEREIRA-FILHO, E. R., POPPI, R. J.; ARRUDA, M. A. Z. Employment of factorial design for optimization of pyrolysis and atomization temperatures for Al, Cd, Mo and Pb determination by ETAAS. **Química Nova**. v. 25, n. 2, março 2002. 246-253 p.

SALDANHA, I. C. C. **Aleatorização em Planejamento de Experimentos:Um estudo de Caso**. 2008. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2008.

SHEN, F.J. et. al. **Tool engineers handbook**, 2. ed. London: Mc Graw-Hill Book Company, 2003. 2289 p.

SOMMER, J. The Possibilities of Mobile Hardness Testing: A User-related Hardness Testing Comparison of the Static UCI Method and the Dynamic Rebound Method. 7th European Conference on Non-Destructive Testing n° 10, v. 3. 1998, Germany.

SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos em Materiais Metálicos** – Fundamentos Teóricos e Práticos. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos em Materiais Metálicos** – Fundamentos Teóricos e Práticos. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

ULTRASONIC HARDNESS TESTING: - Quick and non-destructive, Ultrasonics, Volume 4, Issue 2, April 1966, Elsevier, 88-91 p.

**WERKEMA, M.C.C., AGUIAR,S. Otimização estatística de processos: como determinar a condição de operação de um processo que leva ao alcance de uma meta de melhoria,**  
Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1996.

## ANEXOS

ANEXO A - Tabela A1: Perfil de dureza transversal – CDP 11

Medidas Distancia	MIC10 - Perfil de dureza - CDP 11					Média -
	1 0 mm	2 10 mm	3 20 mm	4 30 mm	5 40 mm	
1	156	163	157	167	165	160,75
2	156	154	148	152	155	153
3	143	145	145	152	154	147,8
4	149	145	142	151	155	148,4
5	147	142	146	150	154	147,8
6	151	147	142	149	151	148
7	148	147	146	148	144	146,6
8	145	147	140	144	149	145
9	139	143	143	149	149	144,6
10	138	138	151	144	149	144
11	142	144	143	147	148	144,8
12	143	142	144	139	143	142,2
13	140	145	139	147	151	144,4
14	138	145	143	142	146	142,8
15	147	142	145	145	145	144,8
16	145	140	138	140	147	142
17	143	142	139	145	141	142
18	138	142	144	141	146	142,2
19	144	134	147	139	142	141,2
20	143	138	138	142	149	142
21	143	135	138	138	157	142,2
22	145	137	143	144	155	144,8
23	140	131	141	134	143	137,8
24	138	140	141	132	148	139,8
25	146	136	135	136	149	140,4
26	146	133	132	132	149	138,4
27	145	136	126	136	144	137,4
28	134	133	143	133	142	137
29	134	133	129	137	141	134,8
30	132	128	128	142	151	136,2
31	137	130	137	134	151	137,8
32	143	135	142	144	166	146
33	138	140	139	142	150	141,8
34	138	142	132	141	154	141,4
35	143	150	141	142	155	146,2
36	137	139	139	150	150	143
37	137	140	146	146	151	144
38	140	138	139	142	151	142
39	144	145	139	143	153	144,8
40	137	144	147	155	149	146,4
41	136	141	139	148	145	141,8
42	139	139	147	149	154	145,6
43	146	143	145	154	153	148,2
44	140	142	146	151	150	145,8
45	151	143	146	158	149	149,4
46	145	144	145	158	150	148,4
47	144	149	144	153	149	147,8
48	143	140	143	157	152	147
49	150	148	146	148	146	147,6
50	141	148	148	151	148	147,2
51	143	149	153	154	146	149
52	154	146	151	153	147	150,2
53	151	153	147	152	152	151
54	149	159	147	149	148	150,4
<b>Media</b>	143,04	142,11	142,30	145,76	149,65	143,30
<b>Desvio Pad</b>	5,46	6,77	5,93	7,42	5,02	6,39

ANEXO B - Tabela A2: Experimento com 2<sup>2</sup> fatorial obtido no Minitab.

Medidas	LIXA	RESFRIAMENTO	DUREZA	Resíduo1
1	-1	-1	155	-2,2
2	1	-1	155	-0,8
3	-1	1	155	-0,6
4	1	1	149	-2,1
5	-1	-1	154	-3,2
6	1	-1	146	-9,8
7	-1	1	159	3,4
8	1	1	158	6,9
9	-1	-1	164	6,8
10	1	-1	144	-11,8
11	-1	1	156	0,4
12	1	1	147	-4,1
13	-1	-1	164	6,8
14	1	-1	154	-1,8
15	-1	1	154	-1,6
16	1	1	146	-5,1
17	-1	-1	169	11,8
18	1	-1	167	11,2
19	-1	1	154	-1,6
20	1	1	153	1,9
21	-1	-1	156	-1,2
22	1	-1	169	13,2
23	-1	1	163	7,4
24	1	1	156	4,9
25	-1	-1	153	-4,2
26	1	-1	162	6,2
27	-1	1	150	-5,6
28	1	1	148	-3,1
29	-1	-1	159	1,8
30	1	-1	156	0,2
31	-1	1	148	-7,6
32	1	1	147	-4,1
33	-1	-1	147	-10,2
34	1	-1	154	-1,8
35	-1	1	157	1,4
36	1	1	153	1,9
37	-1	-1	151	-6,2
38	1	-1	151	-4,8
39	-1	1	160	4,4
40	1	1	154	2,9