TESE
984

LA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA

Determinação dos Fatores Significativos do Processo de Corte por Plasma a Ar Comprimido Através da Utilização do Projeto e Análise de Experimentos

CARLOS ALBERTO MONT'ALVÃO

ITAJUBÁ - Junho de 1998

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

Carlos Alberto Mont' Alvão

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca
MAUÁ
BIM

Determinação dos Fatores Significativos do Processo de Corte Por Plasma a Ar Comprimido Através da Utilização do Projeto e Análise de Experimentos

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção

Orientador: Sebastião Carlos da Costa
Co-Orientador: Pedro Paulo Balestrassi

Itajubá, junho de 1998

MONT'ALVÃO, Carlos Alberto. *Determinação dos Fatores Significativos do Processo de Corte por Plasma a Ar comprimido Através da Utilização do Projeto e Análise de Experimentos.* Itajubá: EFEI, 1998. 80p. (Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Escola Federal de Engenharia de Itajubá).

Palavras-Chaves: Projeto de Experimentos - Corte por Plasma

Ministério da Educação e do Desporto

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

ANEXO I

PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada pela Portaria nº 134 de 18 de junho de 1998, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "Determinação dos Fatores Significativos do Processo de Corte por Plasma a Ar Comprimido através da Utilização do Projeto e Análise de Experimentos" apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Produção**, na **Área de Concentração: Qualidade e Produtividade**, satisfeitas as demais exigências regimentais, à Carlos Alberto Mont'Alvão.

Itajubá, 19 de junho de 1998.

Prof. Messias Borges Silva
1º Examinador – FAENQUIL

Prof. Pedro Paulo Balestrassi
2º Examinador – EFEI

Prof. Sebastião Carlos da Costa
3º Examinador - EFEI - (Orientador)

Ministério da Educação e do Desporto
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

ANEXO II

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: **"Determinação dos Fatores Significativos do Processo de Corte por Plasma a Ar Comprimido através da Utilização do Projeto e Análise de Experimentos".**

Autora: Carlos Alberto Mont'Alvão.

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
1º	A	
2º	A	
3º	A	
xxxx	xxxx	xxxx

Resultado Médio: Conceito A, ou seja, Aprovado

Observações: _____

Itajubá, 19 de junho de 1998.

Prof. Messias Borges Silva
1º Examinador - FAENQUIL

Prof. Pedro Paulo Balestrassi
2º Examinador - EFEI

Prof. Sebastião Carlos da Costa
3º Examinador - EFEI - Orientador

Pró-Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação - EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá
Av BPS, 1303 - Cx Post 50 - 37500-000 - ITAJUBÁ/MG - BRASIL - Tel.: (035)629-1118 - 629-1121;
Fax (035)629-1120 - International Dialing: Please replace (035) by (+5535)

Dedico este trabalho à minha esposa Adriane e a minha filha Vanessa.

Agradecimentos

Manifesto meus mais sinceros agradecimentos às seguintes pessoas e instituições:

- Aos Professores Sebastião Carlos da Costa e Pedro Paulo Balestrassi, pela valiosa orientação que tornou possível a conclusão deste trabalho;
- Ao Professor Luiz Fernando Barca pela grande colaboração prestada;
- Aos funcionários da oficina mecânica pelo apoio durante a fase de realização dos ensaios;
- À Escola Federal de Engenharia de Itajubá, através do Departamento de Produção, pela oportunidade de capacitação;
- Aos funcionários da Comissão de Pós-Graduação;
- À CAPES, pelo incentivo financeiro para a realização deste trabalho;
- Aos meus pais e a todas as pessoas que, direta ou indiretamente , contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Dedicatória iii

Agradecimentos iv

Sumário v

Resumo viii

Abstract ix

Lista de figuras x

Lista de tabelas xi

Lista de símbolos xii

1. INTRODUÇÃO

1.1. Justificativa do tema 1

1.2. Ojetivos 2

1.3. Contribuição do trabalho 3

1.4. Limitações 3

1.5. Organização do texto 3

2. PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS

2.1. Introdução 6

2.2. Projeto e Análise de Experimentos 7

2.3. Projeto e Análise de Experimentos Passo a Passo 9

2.3.1. Conhecimento e Exposição do Problema 9

2.3.2. Escolha dos Fatores e Níveis 10

2.3.3. Seleção da(s) Resposta(s) 10

2.3.4. Escolha do Projeto de Experimentos 10

2.3.5. Realização do Experimento 10

2.3.6. Análise dos Resultados 11

2.3.7. Conclusões e recomendações 11

2.4. Princípios Básicos do Projeto e Análise de Experimentos 11

2.4.1. Replicagem 12
2.4.2. Aleatorização 13
2.4.3. Blocagem 13
2.5. Como Projetar e Analisar e Experimentos 13
2.6. Planejamento Fatorial 15
2.6.1. Planejamento Fatorial 2^K 16
2.6.2. Cálculo dos Efeitos Devido à Alteração nos Níveis dos Fatores 18
2.6.2.1. Cálculo dos Efeitos Principal 19
2.6.2.2. Cálculo dos Efeitos das Interações Entre Fatores 21
2.6.3. Estimativa do Erro Experimental 23
2.7. Interpretação dos Resultados 25
2.8. Interpretação dos Resultados por Meio do Gráfico Normal 27
2.9. Planejamento Fatorial Fracionado 29
2.9.1. Introdução 29
2.9.2. Obtenção da Fração 31
2.9.3. Relações Geradora 31
2.9.4. Resolução da Experimentação 33
2.9.5. Construção e Análise do Planejamento Fatorial Fracionado 34
2.9.6. Comentários Gerais 35
3. CORTE POR PLASMA
3.1. Introdução 38
3.2. Corte Por Plasma a Ar Comprimido 41
3.3. Influência dos Gases 43
3.4. Qualidade x Fatores No Corte Por Plasma 45
4. ESTUDO DE CASO
4.1. Introdução 49
4.2. Planejamento 49
4.2.1. Equipamentos 51
4.2.2. Instrumentos 51
4.3. Preparação 52
4.4. Execução 54
4.4.1. Coleta dos Dados 54
4.5. Cálculos e Interpretação dos Resultados 57

4.5.1. Resultados Para a Perda de Massa 58
4.5.1.1. Interpretação dos Resultados da Perda de Massa Através do Gráfico Normal 58
4.5.1.2. IntervalodeConfiança 59
4.5.1.3. Gráfico dos Efeitos Principal dos Fatores Para a Perda de Massa 61
4.5.2.Resultados Para a Formação de Escória 62
4.5.2.1. Interpretação dos Resultados Por Meio do Gráfico Normal 62
4.5.2.2. Intervalo de Confiança 62
4.5.2.3. Gráfico dos Efeitos Principal Para a Formação de Escória 64
4.5.3. Resultados Para o Acabamento Superficial 65
5. CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES GERAIS E COMENTÁRIOS FINAIS
5.1. Conclusões 68
5.2. Considerações gerais 68
5.3. Comentários finais 69
ANEXO 1
ANEXO 2
ANEXO 3
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

RESUMO

Este trabalho é uma aplicação da técnica Projeto e Analise de Experimentos no Processo de Corte Por Plasma a Ar Comprimido. O principal objetivo foi o de identificar a influência de alguns fatores deste processo na qualidade do corte. Dentre os vários fatores que envolvem este processo, foram avaliados a velocidade de corte, distância do bico de corte à peça, pressão do ar comprimido e corrente. Como parâmetros de qualidade de corte foram analisados a perda de massa durante o corte, a formação de escória e o acabamento superficial da superfície cortada. Para o acabamento superficial não foi possível identificar a influência deste fatores devido a considerável dispersão de resultados desta resposta. Para a perda de massa e formação de escória identificou-se o fator velocidade como o mais significativo. O aumento no nível deste fator produziu uma redução nos valores destas respostas. Como segundo fator mais significativo, identificou-se o fator distância. Um aumento no nível deste fator produziu um aumento nestas respostas. Com um menor grau de significância identificou-se os fatores corrente e pressão , respectivamente. O aumento na pressão produziu uma redução nestas respostas. O aumento na corrente produziu um aumento nestas respostas.

ABSTRACT

This work is an application of the Design and Analyses of Experiments in the Air Plasma Arc Cutting. The main objective was to identify the influence of some factors of this process in the cut quality. Among many factors involved in the process as a whole, the cutting velocity, stand off, gas pressure and current were evaluated. As a parameter for the cut quality evaluation, the loss of material during cutting, the slag formation and the surface finish were analysed. To the surface finish evaluation the identification of the influence of these factors were not possible due to widespread of the results on the response values. To the loss of material and slag formation, the factor cutting velocity was the more important. The increase on its level resulted in a reduction of the response values. The factor stand off was identified as a second factor more important. The increase on its level resulted in an increase on the response values. The factors current and gas pressure showed a lower influence in the process. The increase on the gas pressure resulted in a reduction on the responses. The increase on the current level resulted in an increase of the responses generated.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Um processo pode ser considerado uma função que liga os fatores de entrada às resposta 8

Figura 2.2 Gráfico da densidade de probabilidade de uma distribuição normal 28

Figura 2.3 Probabilidade acumulada em uma distribuição normal 28

Figura 2.4 Gráfico da figura 2.3 no papel de probabilidade normal 28

Figura 3.1 Comparação entre o corte a Laser e o corte por plasma 39
Fonte: Messer e Griesheim

Figura 3.2 Descrição da tocha para corte por plasma 40

Figura 3.3 Construção típica de uma pistola de plasma a ar comprimido. 42
Fonte: Welding & Metal Fabrication, Abril de 1993

Figura 3.4 Influência do sentido de deslocamento da pistola. 47
Fonte: ROCA, M A G; Trabalho de Diploma - EFEI

Figura4.1 Bancada de ensaio 52

Figura4.2 Corpo de prova 53

Figura 4.3 Representação esquemática do modo com foi medido o acabamento superficial 56

Figura 4.4 Gráfico Normal gerado para a perda pelo *Statgraphics* 59

Figura 4.5 Gráfico dos efeitos principal para a perda de massa gerado pelo *Statgraphics* 61

Figura 4.6 Gráfico normal para a formação de escória gerado pelo *Statgraphics* 63

Figura 4.7 Gráfico dos efeitos principal para a formação de escória gerado pelo 65

Figura 4.8 Comparação entre as condições inicial e final do bico de corte 66

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Matriz de planejamento para um planejamento fatorial 2^K genérico 17

Tabela 2.2 Matriz de planejamento para um planejamento fatorial 2^K genérico e suas interações 22

Tabela 2.3 Número de efeitos principal e de interações em função do Número de fatores K 29

Tabela 2.4 Relação entre os contrastes do planejamento básico 2^{5-2} e os efeitos do planejamento fatorial completo 2^5 33

Tabela 3.1 Gases de plasma e suas propriedades. Fonte: Messer e Griesheim 43

Tabela 4.1 Fatores e seus respectivos níveis 51

Tabela 4.2 Matriz de planejamento da experimentação 54

Tabela4.3 Coleta de dados 57

Tabela 4.4 Efeitos estimados para a perda de massa e seus respectivos erros padrão 58

Tabela 4.5 Efeitos estimados para a formação de escória e seus respectivos erros padrão 62

Tabela 4.6 Efeitos estimados para o acabamento superficial e Seus respectivos erros padrão 66

LISTA DE SÍMBOLOS

q - Quantidade de níveis

k - Número de fatores do experimento

(+) - Nível superior de um fator

(-) - Nível inferior de um fator

Fat 1 - Fator 1

Fat 12- Interação entre os fatores 1 e 2

Y - Resposta medida

n - Indica o número do tratamento

r - Indica a repetição do tratamento

$\overline{Y_n}$ - Média dos valores observados para o tratamento n

$\overline{\overline{Y}}$ - Média dos resultados de todos os tratamentos

E_k - Efeito principal do fator k

Y_{n-} - Todos os tratamentos do fator k que se encontram no nível (-)

Y_{n+} - Todos os tratamentos do fator k que se encontram no nível (+)

s^2 - Variância experimental

ν - Número de graus de liberdade

s_n^2 - Variância experimental do n-ésimo tratamento

s - Desvio padrão ou erro experimental

a_n - Combinação linear dos efeitos

$\sigma_{\overline{Y}}^2$ - Variância populacional da média dos valores observados

σ^2 - Variância populacional

N - Número de elementos da amostra

N-1 - Número de graus de liberdade

($\overline{x}$, s)- Estimativas amostrais da média populacional μ e da variância populacional σ^2

t - Distribuição de Student

W - Variável aleatória

P - Número de fatores no planejamento fatorial fracionado

L - Contraste (efeito) no planejamento fatorial fracionado

I - Coluna identidade

N_{ec} - Número de efeitos que compõe o contraste

TIG - Tungsten Inert Gas

CP - Corpo de Prova

A - representa o fator pressão

B - Representa o fator corrente

C - Representa o fator velocidade

D - Representa o fator distância

AB - Representa a interação entre os fatores A e B

m_i - Massa inicial

m_f - Massa final

m_e - Massa de escória

m_{ef} - Massa de escória formada

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO

1.1. JUSTIFICATIVA DO TEMA:

É muito comum, nos dias de hoje, deparar-se com expressões do tipo: "A globalização da economia; a luta pela sobrevivência; a busca pela qualidade total" entre outras. Segundo **Campos (1994)** são todas elas, reflexos de uma rápida evolução social, tecnológica e sobretudo mental que a humanidade vem experimentando. Não nos é muito distante, a abertura de mercados detentores de uma economia extremamente fechada e, a referência americana como sinônimo de excelência em qualidade. As alterações destas concepções tem refletido grandes influências nas organizações geradoras de bens e serviços. Certamente, uma das conseqüências destas alterações tem sido as dimensões que as organizações tem enxergado para o significado da palavra qualidade.

Dentro deste contexto, o aprimoramento contínuo tem sido sempre buscado. A aplicação de ferramentas da qualidade tem auxiliado no aprimoramento contínuo de muitos processos.

O Processo de Corte por Plasma, assim como o Processo de Corte a Laser e o Processo de Corte Oxi-acetilênico são os principais processos térmicos de corte que estão disponíveis para a manufatura. Apesar de cada um destes processos apresentar particularidades tais como, campo de aplicação e custo financeiro, tem-se observado na literatura que o Processo de Corte Por Plasma, graças ao seu desenvolvimento tecnológico, torna-se cada dia mais competitivo. O objetivo principal deste desenvolvimento é melhorar o rendimento do processo e aproximá-lo do Processo de Corte a Laser. Dentre as principais variações deste processo, o Corte por Plasma a Ar Comprimido tem se tornado popular, principalmente em razão do baixo custo do equipamento, a despeito de suas limitações especialmente relacionadas as baixas espessuras de corte.

A qualidade do corte é função de fatores como a pressão do gás, o tipo e a espessura do material que se pretende cortar, a velocidade de corte, a intensidade de corrente, a distância do bico de corte à peça e etc. O objetivo principal de todo processo de corte é atingir o corte ótimo, definido pelo bom acabamento superficial, a baixa perda de massa durante o corte e ausência de escória. A alteração de valores (níveis) dos fatores como os citados, afetam a qualidade do corte. Há um interesse em avaliar tais fatores, cuja conhecimento seria de grande importância para o aprimoramento do processo e o presente trabalho se propõe a isto.

Situações como a aqui comentada são freqüentemente encontradas na literatura técnica, através de trabalhos científicos que discorrem sobre os efeitos acarretados em uma determinada resposta de interesse, ao se alterar os níveis de alguns fatores de um processo analisado. Boa parte destes trabalhos apresentam análises estatísticas dos resultados com um bom grau de refinamento. Entretanto, como citam **Neto et al (1995)**, não existe refinamento estatístico que corrija distorções nos resultados provocadas por um ensaio experimental mal elaborado. É preciso portanto que especial atenção seja dada a fase de elaboração destes ensaios.

Desta forma, é preciso utilizar ferramentas estatísticas que também tenham preocupação com a fase inicial da investigação, ou seja, que se preocupem com o Projeto do Experimento. Neste sentido, a ferramenta escolhida para auxiliar na solução deste desafio foi o Projeto e Análise de Experimentos (*Design of experiments - DOE*) que, apesar de ter suas primeiras publicações na década de 30 e de ser ainda pouco conhecida, vem despertando um grande interesse no meio acadêmico e produtivo, após as idéias apresentadas pelo **Genesi Taguchi** nos anos 80. Alguns trabalhos encontrados durante a fase de revisão bibliográfica demonstram a importância desta ferramenta. Como exemplo, **Connell** e **Pherson (1997)**, relatam o sucesso da aplicação desta técnica que permitiu a redução do índice de defeito em um determinado processo de soldagem de 47% para 0,074%, sendo realizados apenas 18 testes (tratamentos) contra os mais de 2000 que seriam necessários, caso a técnica não fosse aplicada.

Assim, os conceitos do Projeto e Análise de Experimentos foram aplicados ao Processo de Corte por Plasma a Ar Comprimido, com o objetivo de permitir um melhor entendimento dos efeitos produzidos na qualidade do corte, quando os fatores estudados sofrerem alterações em seus valores.

1.2. OBJETIVOS:

Este trabalho tem como objetivo principal a determinação, através do Projeto e Análise de Experimentos, da significância e da influência dos fatores: *Pressão*, *Corrente*, *Velocidade* e *Distância*, na *perda de material*, na *formação de escória* e no *acabamento superficial* do Processo de Corte Por Plasma a Ar Comprimido de um aço carbono SAE 1020.

Para que este objetivo principal fosse alcançado, foi necessário estabelecer alguns objetivos secundários. Dentre eles pode-se citar:

- Elaborar a revisão bibliográfica referentes aos capítulos 2 e 3;
- Definir os níveis dos fatores analisados e o projeto de experimento a ser empregado;

- Definir as respostas a serem analisadas e a maneira pela qual as mesmas seriam medidas.

1.3. CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO:

A principal contribuição do trabalho é a de motivar aqueles que se utilizam de ensaios experimentais a utilizarem a técnica Projeto e Análise de Experimentos. Para tanto, o Capítulo 2 procura descrever de uma forma bem generalizada e de fácil compreensão, a utilização desta técnica. Não se pretende portanto tratar as diversas particularidades que envolvem esta técnica, que quando mencionadas são referenciadas para aqueles que por elas se interessarem.

Outra contribuição deste trabalho é a de fazer uma investigação dos fatores Pressão, Velocidade, Corrente e Distância na qualidade do Processo de Corte por Plasma a Ar Comprimido. Esta investigação também é importante devido ao grande desenvolvimento tecnológico que este processo vem sofrendo. Um dado que revela o expressivo desenvolvimento desta técnica é a comparação entre a receita gerada pela produção, nos Estados Unidos, de equipamentos com tecnologia plasma em 1984 (350milhões de dólares) e a produção de equipamentos com tecnologia plasma em 1995 (10,5 bilhões de dólares) **(COSIPMAP, 1998)**.

1.4. LIMITAÇÕES:

Este trabalho se limita a aplicação do Projeto de Experimentos Clássico. Apesar do principal responsável pelo ressurgimento da Técnica Projeto e Análise de Experimentos, **Genesi Taguchi**, defender a utilização de Arranjos Ortogonais, optou-se pelo Projeto e Análise de Experimentos Clássico pelo motivo que o autor deste trabalho entende de, primeiro se estudar o Projeto e Análise de Experimentos Clássico, antes de se estudar as inovações por ele apresentadas. Outras limitações deste trabalho dizem respeito aos recursos do equipamento de corte utilizado e aos recursos financeiros disponíveis para a realização do experimento.

1.5. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO:

O trabalho está dividido em cinco capítulos, que são comentados a seguir:

- No **primeiro capítulo**, fez-se a introdução, apresentando as justificativas pela escolha do tema, o objetivo que se pretende atingir, as contribuições do trabalho, suas limitações e a organização do texto.

- O **segundo capítulo** procura abordar a técnica Projeto e Análise de Experimentos de uma forma um pouco diferenciada das que normalmente são encontradas na literatura clássica da área. Assim, procurou-se apresentar o assunto de forma generalizada. Observa-se neste capítulo que as tabelas de Matrizes de Planejamento e as equações apresentadas são genéricas. Por serem genéricas as mesmas não podem ser aplicadas quando alguma particularidade se faz presente. O assunto também é apresentado de maneira que a sua prática seja facilitada. O grande número de artigos que tem sido gerado, principalmente em revistas como *Journal of Quality Technology* e *Technometrics*, entre outras, motivaram a referenciar neste capítulo algumas particularidades que estes artigos tratam. Espera-se que a maneira simples como o texto foi apresentada seja um estimulador para os interessados no assunto. Aqueles que por ventura tenham este interesse despertado, encontrarão em **Montgomery (1984)**, **Box et al (1978)** e em trabalhos científicos e artigos de revistas, o complemento necessário.

- Também como parte da pesquisa bibliográfica, o **terceiro capítulo** procura reunir um conjunto de informações que se encontram dispersas em alguns livros e artigos que abordam o Processo de Corte Por Plasma a Ar Comprimido. De forma bem resumida procura-se comparar o Processo de Corte Por Plasma com os seus principais concorrentes. A seguir apresenta-se o princípio de funcionamento do Corte Por Plasma e os novos desenvolvimentos obtidos com este processo. Partindo desta visão mais panorâmica procurou-se descrever em maior detalhe o Processo de Corte Por Plasma a Ar Comprimido. Já com uma apresentação mais detalhada, aborda-se a influência da escolha do tipo de gás utilizado no processo e, para finalizar relata-se as observações feitas por pesquisadores da influência dos fatores ou variáveis do Processo de Corte Por Plasma na qualidade do corte.

- Uma aplicação dos conceitos abordados nos **capítulos 2** e **3** é apresentada no **capítulo 4** em forma de estudo de caso. A introdução deste capítulo identifica os fatores que foram analisados para o Processo de Corte Por Plasma a Ar Comprimido. A seguir é feito um detalhamento das fases do estudo de caso. Na fase de planejamento é feita uma formulação do problema, define-se as respostas a serem medidas, o projeto de experimento adotado, os níveis dos fatores usados na experimentação além de outras definições que se fizeram necessárias. Uma breve descrição dos equipamentos e instrumentos utilizados também é feita. A fase de preparação descreve todas as atividades necessárias antes do início da

experimentação. Com tudo definido e devidamente preparado chegou-se a fase de execução da experimentação. As respostas de interesse foram então coletadas; os efeitos provocados pela alteração nos níveis dos fatores foram calculados e finalmente a interpretação dos resultados obtidos foi realizada.

- No **capítulo 5** é apresentado uma conclusão geral dos resultados obtidos, as considerações gerais de todo o trabalho além de sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2
PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS

2.1. INTRODUÇÃO:

O Projeto e Análise de Experimentos, uma técnica essencialmente estatística, teve o início de seu desenvolvimento nas primeiras décadas do século (por volta de 1930), com os trabalhos pioneiros de Fischer acrescido das contribuições significativas de Yates, Box, Bose, Kempthome, Cochan (**Montgomery, 1984**) e Gosset (**Neto et al, 1995**) que é mais conhecido pelo pseudônimo de "*Student*". O Projeto e Análise de Experimentos permaneceu durante anos como uma técnica que encontrava uma série de dificuldades para sua aplicação. As organizações demandavam por resultados imediatistas e o mercado consumidor não se demonstrava tão exigente quanto nos dias de hoje. O Projeto e Análise de Experimentos *Clássico* (o termo clássico é usado para a diferenciação do Projeto de Experimentos proposto por Taguchi), dentro deste contexto, sofria restrições quanto a sua aplicação, visto que o mesmo demandava disponibilidade de tempo e recursos. Entretanto as alterações no comportamento do mercado consumidor tem acirrado a competitividade entre as organizações, o desenvolvimento tecnológico e as novas abordagens referentes ao conceito de qualidade tem despertado um novo interesse na utilização da técnica de Projeto e Análise de Experimentos. Este interesse ressurge com o sucesso alcançado por algumas organizações japonesas na década de 80 que acreditaram e implementaram as idéias de melhoramento da qualidade proposta por Taguchi, embora mesmo dentro do Japão suas idéias não sejam universalmente conhecidas e aceitas. Para **Nair (1992)** "Antes de 1980, ele era virtualmente desconhecido fora do Japão". **Poon (1996)** comenta que: " Embora seja fortemente criticado por estatísticos, em particular o Arranjo Ortogonal (projeto de experimento proposto por Taguchi), existe um consenso de que a ênfase dada ao uso de experimentos projetados estatisticamente para melhoramento da qualidade do produto e processo, durante a fase de projeto, tem efetivamente estimulado e promovido o uso de Projeto de Experimentos em várias indústrias". Segundo **Kacker (1985)**, o Projeto de Parâmetros proposto por Taguchi pode ser dividido em quatro categorias na seguinte ordem: Filosofia da Qualidade; Metodologia de Engenharia, Projeto de Experimentos e Análise dos Resultados. O Projeto de Parâmetros (também conhecido por Qualidade Robusta) defende uma estratégia experimental diferente do Projeto e Análise de Experimentos Clássico. "Enquanto os estatísticos e os métodos *ad hoc* sugeridos por Taguchi apresentam controvérsias, existe pouca discordância

entre os pesquisadores e praticantes sobre a filosofia básica por ele apresentada (**Khattree, 1996**)". "Apesar de suas idéias talvez serem consideradas revolucionárias, alguns especialistas da área discordam de alguns de seus pontos de vista (**Nair, 1992**)". Dentro deste cenário, optou-se portanto pelo estudo do Projeto de Experimentos Clássico até mesmo como forma de, em um futuro próximo, facilitar a compreensão do Projeto e Análise de Experimentos proposto por Taguchi.

O vocabulário e símbolos aqui usados atendem as especificações da *International Organization for Standardization - Statistic - Vocabulary and symbols - Part 3:Design of experiments (1985).*

2.2. PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS:

Normalmente quando alguém se vê diante de uma grande quantidade de resultados, socorre-se da teoria estatística para extrair destes, as informações que julga ser interessantes. Entretanto, é raro preocupar-se com a forma ou procedimento que levou-o a estes resultados. Para melhor se avaliar a importância do projeto de um experimento, suponha a seguinte situação: um fabricante de aquecedor solar resolveu testar dois diferentes tipos de aquecedores para avaliar qual deles era capaz de absorver a maior quantidade de energia. Para tanto, resolveu testar quatro aparelhos de cada tipo, tomando o cuidado de que todos os aquecedores estivessem expostos ao tempo durante o mesmo período em todos os dias. Como o fabricante não tinha interesse em favorecer nenhum dos dois tipos de aquecedores, ele resolveu sortear dentre os oito aparelhos que seriam testados, a ordem dos dias em que os testes seriam realizados. Após esses cuidados iniciais, o fabricante realizou os testes e em função dos resultados concluiu que um determinado tipo de aquecedor era melhor que o outro. Todavia, sem até mesmo conhecer os resultados, pode-se questionar a conclusão obtida. Em um caso como este, deverse-ia testar os dois aparelhos simultaneamente , com o objetivo de eliminar as influências causadas nos resultados em função das variações que podem ocorrer no tempo. Para situações onde isto não seja possível, **John (1990)** apresenta um procedimento que identifica uma escolha apropriada de seqüência de testes. Assim, pode-se perceber que o projeto do experimento é a atividade estatística mais importante de um experimento. Projetando-se mal ou até mesmo não se projetando um experimento, toda a análise dos resultados fica comprometida. Não existe refinamento estatístico que seja capaz de corrigir as distorções nos resultados devido

a esta falha. A análise dos resultados é portanto, uma atividade que depende, e muito, de sua etapa anterior, o projeto do experimento.

Uma característica muito interessante desta técnica é o seu vasto campo de aplicação. De um modo geral, pode-se aplicar a técnica Projeto e Análise de Experimentos a situações que se apresentem da forma mostrada na ***figura 2.1***:

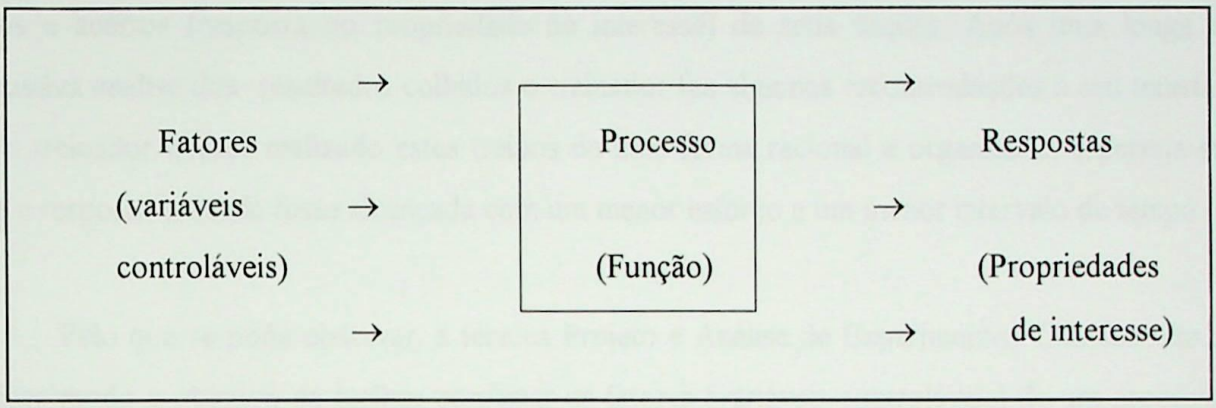


Figura 2.1: Um processo pode ser considerado uma função que liga os fatores de entrada às respostas.

Algumas situações onde esta técnica pode ser aplicada:

Exemplo 1: Uma dada reação química é controlada por apenas dois fatores (duas variáveis): temperatura e concentração de um dos reagentes. A reação química é o processo (descrito por uma função) que produz determinada quantidade de uma substância química. O químico responsável deseja que esta reação produza a maior quantidade possível desta substância. Assim sendo, o rendimento pode ser a resposta de interesse (propriedade).

Exemplo 2: A temperatura de cementação, o teor de carbono do aço, o tempo de permanência na temperatura de cementação e o tipo de cemento utilizado são fatores (variáveis controláveis) que interferem no processo (descrito por uma função) de introdução de carbono na superfície de um aço carbono. Uma resposta (propriedade) de interesse deste processo pode ser a quantidade de carbono introduzida na superfície do aço.

Exemplo 3: O processo de aprendizagem pode ser influenciado por alguns fatores (variáveis controláveis) tais como: aulas com ou sem recursos áudio visuais; exploração do conteúdo através da realização de aulas expositivas ou seminários e o número de alunos, entre outras. O conhecimento absorvido pelos alunos pode ser uma resposta (propriedade) de interesse medida por meio de aplicação de provas.

Exemplo 4: Um tenista profissional acredita que alguns fatores (variáveis controláveis) interferem na precisão de seu saque. O tenista acredita que uma melhor combinação dos fatores: tamanho da raquete, tipo de saque, lado do saque e o tipo de revestimento da quadra influenciam na precisão de seu saque. Para melhorar a precisão, seu treinador solicita-lhe que faça uma interminável série de treinos, variando ao acaso estas variáveis e anota o número de erros e acertos (resposta ou propriedade de interesse) de seus saques. Após uma longa e exaustiva análise dos resultados colhidos o treinador faz algumas recomendações a seu tenista. Se o treinador tivesse realizado estes treinos de uma forma racional e organizada, esperaria-se que a resposta buscada fosse alcançada com um menor esforço e um menor intervalo de tempo.

Pelo que se pode observar, a técnica Projeto e Análise de Experimentos Clássico tem a grosso modo o objetivo de melhor combinar os fatores (variáveis controláveis) de um processo (descrito por uma função) de modo a otimizar determinada(s) resposta(s) (características) de interesse extraindo o máximo de informação com um número mínimo de experimentos. Além de otimizar uma determinada resposta, a realização do Projeto e Análise de Experimentos Clássico possibilita identificar os fatores significativos de um processo e seus respectivos níveis ótimos, permitindo assim que seja obtida uma redução da variabilidade do produto, o que é de fundamental importância em termos de qualidade.

2.3. PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS PASSO A PASSO:

A essência de um bom planejamento consiste em projetar um experimento de forma que ele seja capaz de fornecer exatamente o tipo de informação que se procura. Para isto é necessário que todos os envolvidos tenham uma clara idéia do que exatamente está sendo estudado, de como os resultados serão coletados , e finalmente como serão avaliados. Para ter a certeza de que um projeto de experimento seja bem planejado, **Montgomery (1984)**, recomenda que os passos abaixo sejam seguidos:

2.3.1. Conhecimento e Exposição do Problema:

Isto pode parecer um ponto bastante óbvio mas, na prática, ele freqüentemente não é simples de ser percebido e nem é simples desenvolver uma clara idéia do problema. O conhecimento do problema conduzirá a um melhor entendimento da solução final do problema.

2.3.2. Escolha dos Fatores e Níveis:

Os experimentadores devem selecionar os fatores (também chamados de variáveis independentes) a serem investigados em um experimento. Eles podem ser quantitativos ou qualitativos. Os experimentadores devem também selecionar as faixas sobre as quais esses fatores (variáveis independentes) irão oscilar e o número de níveis (valores dentro destas faixas) no qual os experimentos serão realizados. Estes níveis podem ser especificados ou selecionados aleatoriamente do conjunto de todos os níveis de fatores possíveis.

2.3.3. Seleção da(s) Resposta(s):

Ao escolher uma resposta os experimentadores devem estar certos de que a resposta a ser medida realmente lhes forneça a informação sobre o problema em estudo. A forma como a resposta será medida e a sua precisão também deverão ser pensados.

2.3.4. Escolha do Projeto de Experimentos:

Este passo é de fundamental importância no processo experimental. Os experimentadores devem determinar a diferença na verdadeira resposta que eles desejam detectar e a magnitude do risco que eles estão dispostos a tolerar, sendo assim, um apropriado número de replicações deve ser escolhido. Os experimentadores devem também determinar a ordem na qual os resultados serão coletados e o método de aleatorização que será empregado. Vale lembrar que os experimentadores deverão buscar um equilíbrio entre a acurácia estatística e custos. Ao selecionar um projeto, é importante manter em mente o objetivo da experimentação. Em muitos experimentos já se sabe de início que alguns fatores produzem diferentes respostas. Consequentemente, nestes casos, é interessante identificar quais fatores causam estas diferenças e estimar a magnitude na mudança das respostas. Em outras situações, pode-se estar mais interessado em verificar a uniformidade do processo, alterando-se algumas condições.

2.3.5. Realização do Experimento:

Este é o efetivo processo de coleta de resultados. Os experimentadores devem cuidadosamente monitorar o avanço do experimento para garantir que se está procedendo de acordo com o plano. Atenção particular deve ser dada a aleatorização, acurácia das medições e a manutenção tão uniforme quanto possível do ambiente experimental.

2.3.6. Análise dos Resultados:

Métodos estatísticos devem ser empregados na análise dos resultados do experimento. O avanço tecnológico da informática tem contribuído muito para a execução desta etapa. **Nachtsheim (1987)** analisa as vantagens e desvantagens dos *softwares*: *DESIGN-EASE, JASS, CADE, STATGRAPHICS, XSTAT, ECHIP, COED and RSM, RS/DISCOVER, ACED, SIMPLEX-V* e *ULTRAMAX*. Existem atualmente versões mais atualizadas de alguns destes *softwares* e outros excelentes como o *STATISTICA, SPSS* e *MINITAB*, capazes de analisar os resultados do experimento projetado. Técnicas gráficas são particularmente úteis na análise dos resultados.

2.3.7. Conclusões e Recomendações:

Uma vez que os resultados tenham sido analisados, os experimentadores devem tirar conclusões ou fazer inferências sobre os resultados. As inferências estatísticas devem ser fisicamente interpretadas e a significância prática destes descobrimentos avaliadas.

Coleman e Montgomery (1993) consideram os três primeiros destes passos como atividades de uma fase chamada de planejamento do pré-experimento que acreditam ser crítica para a bem sucedida solução dos problemas dos experimentadores. Eles afirmam: "Freqüentemente é dito que nenhum experimento caminha exatamente como o planejado". Uma das razões apontadas para isto é a existência de um *gap* de conhecimento existente entre os que projetam o experimento (estatísticos) e os experimentadores (engenheiros e cientistas). A não observação da existência deste *gap* pode conduzir a conseqüências sérias.

2.4. PRINCÍPIOS BASICOS DO PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTO:

Existem três princípios básicos para o Projeto e Análise de Experimentos. Para melhor compreende-los imaginou-se a seguinte situação: Um fabricante de sapatos desenvolveu um novo tipo de solado mais barato do que o que vinha usando. Preocupado em pelo menos manter o mesmo desgaste do solado, o fabricante resolveu fazer alguns testes para descobrir se este novo solado poderia substituir o atual. Para tanto, ele escolheu dois garotos e pediu-lhes que cada um usasse um tipo de sapato (um com o solado atual e o outro com o solado mais barato), durante um mesmo período de tempo. Como o fabricante estava ansioso em conhecer o

comportamento do desgaste dos solados, ele resolveu acompanhar as atividades realizadas pelos dois garotos no período em que os mesmos usavam os sapatos. Não foi preciso muito tempo para o fabricante concluir que o resultado a ser obtido não seria confiável pois, enquanto um garoto corria, saltava e jogava bola; o outro permanecia a maior parte do período em casa, estudando ou assistindo televisão. Como os dois garotos calçavam o mesmo número, o fabricante pediu-lhes que trocassem o pé direito de seus sapatos. Assim os dois solados estariam sujeitos a mesma condição de desgaste. Desse modo, intuitivamente o fabricante tinha realizado uma *blocagem* em seu experimento. Após esta fase inicial , o fabricante passou a ficar mais crítico com relação a seus experimentos. Observando um pouco mais os garotos, o fabricante começou a perceber que enquanto um garoto arrastava mais a perna esquerda, o outro arrastava mais a direita. Como ele tinha pedido aos garotos que apenas trocassem o pé direito, logo percebeu que continuava a favorecer um tipo pois, nesta situação os dois solados continuavam a ser comparados em condições diferentes de uso. Como o fabricante não tinha interesse em favorecer nenhum dos dois tipos de solados, resolveu refazer o experimento, com a diferença de que o tipo de solado a ser utilizado no pé esquerdo ou pé direito seria agora sorteado. Sorteado um tipo de solado para um pé, o outro pé usaria o outro tipo. Dessa forma, o fabricante não estaria mais favorecendo nenhum tipo de solado. Agora, intuitivamente, o fabricante tinha introduzido em seu experimento o conceito da *aleatorização*. Concluído este experimento, o fabricante continuava a ser crítico com relação a seus experimentos. Agora, seu questionamento era: Será que somente estes dois garotos irão me fornecer resultados confiáveis?; Será que se mais garotos fossem utilizados no experimento o resultado seria o mesmo? Por fim, o fabricante concluiu que se um número maior de garotos utilizassem sapatos com solados diferentes, sorteados aleatoriamente, o seu resultado deveria ser mais preciso. Neste caso a repetição do experimento lhe permitiria fazer uma melhor estimativa do erro experimental. Dessa forma mais um conceito tinha sido introduzido em seu experimento, a *replicagem*.

Introduzidos então os conceitos, tem-se agora as suas definições.

2.4.1. Replicagem:

Replicagem é a repetição de um conjunto completo de todos os tratamentos a serem comparados em um experimento. É uma repetição completa do experimento e tem duas propriedades importantes. A primeira é permitir ao experimentador obter uma estimativa do erro experimental. Esta estimativa do erro experimental torna-se uma medida para determinar se

as diferenças observadas nos resultados são estatisticamente significantes. A segunda é que se a média amostral é usada para estimar os efeitos dos fatores no experimento, então a replicagem permite ao experimentador obter uma estimativa mais precisa destes efeitos.

2.4.2. Aleatorização:

É o fundamento do uso de métodos estatísticos em Projeto de Experimentos. Por aleatorização entende-se que tanto a distribuição do material experimental quanto a ordem de realização dos experimentos são determinados ao acaso. Os métodos estatísticos requerem que as observações (ou erros) sejam variáveis aleatórias independentemente distribuídas. A aleatorização geralmente torna esta suposição válida. O processo de aleatorização nada mais é do que adotar a atitude de não privilegiar, ou seja, dar a mesma oportunidade a todos os elementos de um conjunto de serem os escolhidos.

2.4.3. Blocagem:

Bloco é uma subdivisão do espaço experimental em grupos, cada qual consistindo de unidades semelhantes relativamente homogêneas onde, dentro de cada grupo, o erro experimental é esperado ser menor do que se fosse obtido em todo o espaço experimental. A técnica é usada para aumentar a precisão de um experimento. Um bloco é uma parte do experimento que é esperado ser mais homogêneo. Por limitar a comparação de tratamentos dentro de tais blocos, maior precisão pode freqüentemente ser obtida.

2.5. COMO PROJETAR E ANALISAR EXPERIMENTOS:

A estratégia de experimentação é abordada através do exemplo já citado da cementação (página 8). Como se sabe, alguns fatores como o teor de carbono do aço a ser cementado, o tempo de permanência na temperatura de cementação, a temperatura de cementação e o tipo de cemento, exercem uma influência na quantidade de carbono que é transferida do cemento para o aço carbono. Se é desejado otimizar esta resposta (quantidade de carbono introduzida na superfície do aço carbono), deve-se projetar o experimento e analisar os resultados de modo a descobrir qual a influência e em que nível cada uma dos fatores deve ser ajustado. **Neto et al (1995)**, citam que é muito comum, em função do desconhecimento da técnica Projeto e Análise de Experimentos, utilizar-se uma outra técnica quando se está presente de tal situação. Esta técnica consiste do seguinte pensamento lógico: "Ao encontrar isoladamente qual o nível mais

indicado para cada um dos fatores do processo, tem-se como conseqüência a otimização do processo para a resposta analisada. Assim, alterando-se apenas os níveis de um dos fatores e mantendo-se os demais constantes, encontra-se qual o melhor nível para este fator. Procedendo da mesma forma para os demais fatores e fixando o experimento neste níveis encontrados, a resposta (resultado) obtida representa o ponto ótimo da resposta analisada". O pensamento que parece ser lógico, deixa de ser lógico a partir do instante em que se passa a pensar na existência de interações entre os fatores. A interação entre fatores invalida todo este pensamento lógico porque quando se altera um fator, um ou mais fatores que interagem com este, tem seus supostos níveis ótimos alterados. Como as interações entre os fatores ocorrem com grande freqüência, este pensamento lógico muito provavelmente não conduzirá a resposta desejada. O procedimento correto portanto consiste em alterar ao mesmo tempo todos os fatores.

Como conseqüência, a primeira coisa a se fazer, no planejamento de um experimento, é determinar quais são os fatores e resposta(s) de interesse para o sistema que se deseja estudar. Os fatores e resposta(s) que são controladas pelos experimentadores tanto podem ser quantitativos (temperatura, tempo, pressão, velocidade e etc...) como qualitativos (tipo de cemento, tipo de catalisador, tipo de gás, tipo de reagente e etc...). Um bom conhecimento sobre o que se deseja estudar auxilia na escolha dos fatores e da(s) resposta(s). Todavia, pode ocorrer que os experimentadores muito pouco saibam do problema a ser estudado. Nesta situação é recomendável realizar uma triagem e descartar os fatores não significativos para não se perder tempo e dinheiro. O uso de planejamento fatorial fracionado, visto mais adiante, é uma forma de se fazer isto.

Selecionado os fatores mais importantes, pode-se avaliar a influência dos mesmos sobre a(s) resposta(s) e suas possíveis interações. O planejamento fatorial completo é recomendável para esta situação. Se é desejo prosseguir com o estudo do problema, a modelagem é recomendável. Se for de interesse dos experimentadores, pode-se utilizar da metodologia de superfície de resposta (*Response surface methodology)*, a fim de que se tenha uma modelagem do problema na região de contorno estudada. Obtido o modelo, é necessário que se faça uma avaliação do mesmo. Verificado sua consistência, pode-se extrair as conclusões.

Como já foi mencionado, é preciso fazer variar tudo ao mesmo tempo. Entretanto, é preciso que isto seja feito de uma forma racional e organizada, o que é feito através de planejamentos fatoriais. A seguir, discute-se um tipo particular de Planejamento Fatorial; o Planejamento Fatorial de dois níveis que é o utilizado neste trabalho.

2.6. PLANEJAMENTO FATORIAL:

O tipo de Planejamento Fatorial a ser usado dependerá do objetivo que se deseja atingir com a experimentação. Os experimentadores podem estar interessados em avaliar os efeitos devido a alteração no nível de um ou mais fatores, na otimização da(s) resposta(s) ou ainda querendo descobrir dentro de que faixa os fatores podem ser alterados sem que a qualidade final do produto fique prejudicada.

Para se executar um Planejamento Fatorial é necessário que se defina em que níveis cada fator será estudado. Para o exemplo da cementação, julgando-se necessários a investigação dos fatores: temperatura em *5* níveis e o tempo de permanência no forno em *6* níveis; serão necessários $6 * 5 = 30$ tratamentos (condições experimentais) diferentes. De uma maneira geral diz-se que se para o fator 1 existirem q_1 níveis, para o fator *2* existirem q_2 níveis, para o fator K existirem q_K níveis; o planejamento será um fatorial $q_1 * q_2 *.....* q_K$. O resultado deste fatorial é portanto, o número mínimo de tratamentos necessários para se ter um Planejamento Fatorial Completo.

Pode-se observar que o número de experimentos cresce a medida que mais fatores são utilizados e estes contendo uma maior quantidade de níveis. Como anteriormente mencionado, um número excessivo de experimentos pode inviabilizar sua realização por demandar tempo e dinheiro para sua execução. Assim, o planejamento fatorial em que todos os fatores são estudados em apenas dois níveis é o mais simples de ser realizado e também o mais fácil de ser interpretado. Existindo K fatores, o planejamento de dois níveis irá requerer a realização $2 * 2 * 2 *.....* 2 = 2^K$ tratamentos, sendo então chamado de Planejamento Fatorial 2^K, onde $K = \{1,2,3,.....\}$.

Mesmo com o Planejamento Fatorial 2^K pode ocorrer que sejam necessários muitos experimentos. Considerando, por exemplo, que em um dado processo exista o interesse de avaliar os efeitos devido a alteração no nível de *5* fatores, será necessário realizar $2^5 = 32$ tratamentos. Se uma repetição da experimentação for realizada este número passará para *64* tratamentos. Neste caso o uso do Planejamento Fatorial Fracionado pode ser recomendado.

O Planejamento Fatorial (completo e fracionado), o cálculo dos efeitos dos fatores e de suas interações e a análise dos resultados que são agora apresentados, resultam de uma consulta feita a diversos livros que tratam do assunto. Apesar do conteúdo apresentado não ser inovador, a abordagem generalizada do assunto permitiu o desenvolvimento de tabelas e fórmulas, acrescentando deste modo um diferencial ao assunto. É importante também salientar que o

ressurgimento da técnica projeto e análise de experimentos tem gerado um considerável números de artigos que, quando pertinentes são referenciados no texto.

2.6.1. Planejamento Fatorial 2^K:

É comum utilizar-se no Planejamento Fatorial de dois níveis os sinais (+) e (-) como forma de identificar os níveis superior e inferior respectivamente, tanto para os fatores quantitativos como para os qualitativos. A replicagem do experimento também é comum ser utilizada com o objetivo de permitir que uma estimativa do erro experimental seja realizada.

A ***tabela 2.1*** é conhecida como Matriz de Planejamento e apresenta de forma *genérica* a listagem de todos os possíveis tratamentos (combinações) dos fatores em seus respectivos níveis.

O seguinte algoritmo pode ser utilizado para a construção desta tabela:

- A primeira coluna da tabela deve ser numerada de forma a identificar os tratamentos que serão realizados. Esta numeração não significa que os tratamentos sejam realizados nesta ordem. A ordem de realização dos tratamentos deverá ser aleatória;
- Para a coluna *Fat 1* adotar que os tratamentos de número impar sejam realizados no nível (-) e os de número par sejam realizados no nível (+);
- Para a coluna *Fat 2* adotar que os dois primeiros tratamentos sejam realizados no nível (-), seguidos de dois tratamentos realizados no nível (+), que por sua vez serão seguidos de mais dois tratamentos realizados no nível (-) e assim sucessivamente até que o número total de tratamentos seja atingido;
- Para a coluna *Fat 3* adotar que os quatro primeiros tratamentos sejam realizados no nível (-), seguidos de quatro tratamentos realizados no nível (+), que por sua vez serão seguidos de mais quatro tratamentos realizados no nível (-) e assim sucessivamente até que o número total de tratamentos seja atingido;
- Para a coluna *Fat 4* adotar que os oito primeiros tratamentos sejam realizados no nível (-), seguidos de oito tratamentos realizados no nível (+), que por sua vez serão seguidos de mais oitos tratamentos realizados no nível (-) e assim sucessivamente até que o número total de tratamentos seja atingido;
- Para a coluna *Fat K* adotar que a primeira metade dos 2^K tratamentos seja realizada no nível (-) e a outra metade seja realizada no nível (+);

Tabela 2.1 - Matriz de planejamento para um planejamento fatorial 2^K genérico.

Tratamento	*Fat 1*	*Fat 2*	*Fat 3*	*Fat 4*	.....	*Fat K*	*Respostas*	*Resposta média*
1	-	-	-	-		-	$Y_{11};Y_{12};.....;Y_{1r}$	$\overline{Y}_1$
2	+	-	-	-		-	$Y_{21};Y_{22};.....;Y_{2r}$	$\overline{Y}_2$
3	-	+	-	-		-	$Y_{31};Y_{32};.....;Y_{3r}$	$\overline{Y}_3$
4	+	+	-	-		-	$Y_{41};Y_{42};.....;Y_{4r}$	$\overline{Y}_4$
5	-	-	+	-		.	.	.
6	+	-	+	-		.	.	.
7	-	+	+	-		.	.	.
8	+	+	+	-		.	.	.
9	-	-	-	+		.	.	.
10	+	-	-	+		.	.	.
11	-	+	-	+		.	.	.
12	+	+	-	+		.	.	.
13	-	-	+	+		.	.	.
14	+	-	+	+		.	.	.
15	-	+	+	+		.	.	.
16	+	+	+	+		.	.	.
.	.	.	.	.		.	.	.
.	.	.	.	.		.	.	.
.	.	.	.	.		.	.	.
.	.	.	.	.		.	$Y_{n1};Y_{n2};.....;Y_{nr}$	$\overline{Y}_n$
.	.	.	.	.		.	.	.
.	.	.	.	.		.	.	.
2^K	+	+	+	+		+	$Y_{2^K 1};Y_{2^K 2};.....;Y_{2^K r}$	$\overline{Y}_{2^K}$

- A coluna *Respostas* deverá ser preenchida com os valores observados para cada um dos tratamentos. É interessante observar que a fim de se obter uma melhor estimativa do erro

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

experimental, a experimentação deve ser repetida por duas, três ou mais vezes. A última coluna é o resultado da média dos valores observados para cada um dos tratamentos.

Algumas considerações sobre esta tabela são agora apresentadas:

- A ***tabela 2.1*** esgota todos os tratamentos (combinações) possíveis a dois níveis de K fatores;
- O tratamento número *1* é feito todo no nível (-) e o tratamento número 2^K é feito todo no nível (+);
- Um projeto fatorial 2^K nada mais é que seu antecessor $2^{(K-1)}$ acrescido dos tratamentos do *K-ésimo* fator nos níveis (-) e (+);
- A disposição dos níveis (-) e (+) nas colunas dos fatores alternam-se a cada $2^{(K-1)}$ tratamentos, começando sempre com o sinal (-). Deste modo, para o *Fat 1* tem-se $K = 1$ e os sinais alternam-se a cada tratamento; para *Fat 2* tem-se $K = 2$ e os sinais alternam-se a cada dois tratamentos; para *Fat 3* tem-se $K = 3$ e os sinais alternam-se a cada quatro tratamentos e assim sucessivamente. A adoção de que todas os fatores comecem no nível (-) é arbitrária. O importante é que, feita a escolha, esta seja obedecida até o planejamento final da experimentação;
- A notação Y_{nr} tem o seguinte significado:

  Y indica a resposta observada (característica de interesse medida);

  n indica o número do tratamento - $n = \{1,2,3,4,.....2^K\}$;

  r indica o número da repetição do tratamento - $r = \{1,2,3,.....\}$;
- A notação $\overline{Y}_n$ é o resultado da média dos valores observados para cada tratamento, ou seja:

$$\overline{Y}_n = \frac{Y_{n1} + Y_{n2} + ... + Y_{nr}}{r} \qquad (1.1)$$

- A notação $\overline{\overline{Y}}$ representa o valor médio de todos os valores encontrados para os tratamentos, ou seja, a média das médias:

$$\overline{\overline{Y}} = \sum_{n=1}^{2^k} \overline{Y}_n \qquad (1.2)$$

2.6.2. Cálculo dos Efeitos Devido a Alteração nos Níveis dos Fatores:

Após planejar-se o experimento e executá-lo, é chegado o momento de iniciar-se a avaliação dos efeitos ocasionados pela alteração nos níveis dos fatores.

2.6.2.1. Cálculo dos Efeitos Principais:

Em um Planejamento Fatorial Completo do tipo 2^K (planejamento onde todos os tratamentos possíveis dos fatores em seus níveis são executados), todos os fatores que são analisados possuem a metade dos tratamentos realizados no nível (-) e a outra metade realizada no nível (+). Para um dado tratamento onde um fator qualquer se apresenta no nível (-), existe um outro tratamento quase idêntico a este, com a diferença única que este fator apresenta-se no nível (+), ou seja, existem sempre dois tratamentos em que todos os fatores são mantidos no mesmo nível, exceto o fator que está sendo analisado que ora se apresenta no nível (-) e ora no nível (+). Observando a Matriz de Planejamento genérica (***tabela 2.1***), nota-se que os pares de tratamentos *1*e *2*; *3* e *4*; *5* e *6*; *7* e *8* ..... encontram-se no mesmos nível para o *Fat 2*; *Fat 3; Fat 4*; .....*Fat K*. A diferença em cada um destes pares está na alternância dos níveis (-) e (+) para o *Fat 1*. Calculando o somatório das diferenças dos valores obtidos (Y_n - resposta média da ***tabela 2.1***) para cada um destes pares e dividindo este somatório pelo número de pares utilizados no cálculo do somatório, encontra-se assim o *efeito principal do Fat 1*. Normalmente se utiliza a primeira letra do nome do fator para representar o seu efeito. Como aqui os fatores são identificados pelos números *1*, *2*, *3*, *4*, ...,*K*, identificou-se seus efeitos como E_1, E_2, E_3, E_4, ..., E_K respectivamente. Assim, para o *Fat 1* (daqui em diante passa-se a identificar todos os fatores apenas pelo seus números) tem-se que em um experimento com K fatores seu efeito principal será:

$$E_1 = \frac{\left(\bar{Y}_2 - \bar{Y}_1\right) + \left(\bar{Y}_4 - \bar{Y}_3\right) + \left(\bar{Y}_6 - \bar{Y}_5\right) + \ldots + \left(\bar{Y}_{2^k} - \bar{Y}_{(2^k-1)}\right)}{2^{(k-1)}} \qquad \textbf{(1.3)}$$

Procedendo do mesmo modo, ou seja, encontrando para cada um dos demais fatores os pares de tratamentos que diferem entre si pela alternância do sinal (-) e (+) e, calculando o somatório da diferença destes pares dividido pelo número de pares usados no cálculo deste somatório, encontra-se os efeitos principal E_1, E_2, E_3, E_4, ..., E_K. Encontrar uma formulação geral que permita encontrar os efeitos principais de cada um dos fatores é um trabalho árduo. Entretanto, se ao invés de se fazer a diferença entre os pares de tratamentos, fizer-se o somatório do nível (+) de um fator subtraído do somatório do nível (-) deste mesmo fator e, dividir este resultado pela metade do número de tratamentos realizados, encontra-se da mesma forma os efeitos principal dos fatores. Uma expressão geral que permite encontrar o efeito principal de qualquer fator K é aqui apresentada:

$$E_k = \frac{\sum_{n=1}^{2^k}(Y_{n+}) - \sum_{n=1}^{2^k}(Y_{n-})}{2^{(k-1)}} \tag{1.4}$$

onde:

⇒ E_K - efeito do fator K;

⇒ K- número de fatores do experimento;

⇒ Y_{n+} - são todos os tratamentos do fator K que se encontram no nível (+);

⇒ Y_{n-} - são todos os tratamentos do fator K que se encontram no nível (-).

Conhecendo o número de fatores e obtida a Matriz de Planejamento, é agora possível calcular os efeitos causados pela alteração no nível destes fatores. Como exemplo suponha que uma determinada investigação esteja sendo realizada com *3* fatores. Os efeitos principal E_1, E_2 e E_3 destes *3* fatores podem ser calculados através da ***expressão 1.4***. Calculando os efeitos E_1, E_2 e E_3 obtêm-se:

$$E_1 = \frac{\left(\overline{Y}_2 + \overline{Y}_4 + \overline{Y}_6 + \overline{Y}_8\right) - \left(\overline{Y}_1 + \overline{Y}_3 + \overline{Y}_5 + \overline{Y}_7\right)}{4} \tag{1.5}$$

$$E_2 = \frac{\left(\overline{Y}_3 + \overline{Y}_4 + \overline{Y}_7 + \overline{Y}_8\right) - \left(\overline{Y}_1 + \overline{Y}_2 + \overline{Y}_5 + \overline{Y}_7\right)}{4} \tag{1.6}$$

$$E_3 = \frac{\left(\overline{Y}_5 + \overline{Y}_6 + \overline{Y}_7 + \overline{Y}_8\right) - \left(\overline{Y}_1 + \overline{Y}_2 + \overline{Y}_3 + \overline{Y}_4\right)}{4} \tag{1.7}$$

O cálculo dos $E_{K's}$ efeitos principal dos K fatores podem levar a resultados negativos, nulos ou positivos. Os efeitos que produzirem resultados mais distantes do valor nulo indicarão os fatores e as possíveis interações aos quais maior atenção deverá ser dedicada, porque quanto mais próximo estiver um efeito do valor nulo, mais insensível é a experimentação à alteração dos níveis do fator referente a este efeito. A interpretação do sinal (positivo ou negativo) dependerá do objetivo da experimentação que poderá ser o de maximizar ou minimizar uma resposta.

A interpretação isolada dos efeitos dos fatores que se mostraram sensíveis para a experimentação pode conduzir a conclusões que não sejam verdadeiras. Este fato normalmente ocorre devido a grande possibilidade de interação entre os fatores. Assim sendo, torna-se

necessário calcular os efeitos de todas as possíveis interações entre os fatores de modo a obter uma melhor conclusão da experimentação.

2.6.2.2. Cálculo dos Efeitos das Interações Entre os Fatores:

Antes de iniciar o procedimento descrito para calcular os efeitos das interações é importante que conceito de *ordem de interação* seja apresentado. Dizer que uma interação é de *1ª ordem* é o mesmo que dizer que um fator interage com ele próprio; dizer que uma interação é de *2ª ordem* significa dizer que os fatores interagem dois a dois; de *3ª ordem* que interagem três a três e assim sucessivamente até se chegar a interação de *ordem K* que é a interação entre os *K* fatores. Desse modo, o Planejamento Fatorial 2^4 é por exemplo composto de *4* interações de *1ª ordem* (*Fat 1, Fat 2, Fat 3, Fat 4*), *6* interações de *2ª ordem* (*Fat 12, Fat 13, Fat 14, Fat 23, Fat 24, Fat 34*), *4* interações de *3ª ordem* (*Fat 123, Fat 124, Fat 134, Fat 234*) e uma interação de *4ª ordem* (*Fat 1234*).

As interações de *1ª ordem* são os efeitos principal dos fatores e seus cálculos já foram apresentados. Agora, tem-se interesse no cálculo dos efeitos das interações de ordem superior a *2*. Para melhor compreensão do cálculo dos efeitos destas interações, reproduz-se a Matriz de Planejamento (***tabela 2.1***) com algumas modificações e acréscimos. A identificação anterior dos fatores como *Fat 1*, *Fat 2*, *Fat 3*, *Fat 4*,....., *Fat K* são representadas apenas por seus respectivos números *1*, *2*, *3*, *4*,....., *K*. As colunas acrescidas representam as interações entre os fatores (a coluna *12*, por exemplo, representa a interação entre os fatores *1* e *2*).

A Matriz de Planejamento apresentada (***tabela 2.2***) é igual a Matriz de Planejamento anterior (***tabela 2.1***) acrescida das colunas que representam as interações entre os fatores. A utilização dos sinais (+) ou (-) nestas colunas depende do sinal resultante da multiplicação dos sinais dos fatores que compõe as interações no tratamento. Por exemplo, o sinal obtido para a interação *12* no primeiro tratamento é resultado da multiplicação dos sinais destes fatores no primeiro tratamento, neste caso, (-) * (-) = (+).

O procedimento utilizado para realizar o cálculo dos efeitos das interações não é muito diferente do que foi utilizado para calcular os efeitos principais (efeitos dos fatores). Com o objetivo de facilitar a compreensão do cálculo das interações, usou-se o exemplo da situação mais simples onde, uma possível interação entre fatores pode acontecer que é o Planejamento Fatorial de dois fatores (2^2). Observando a ***tabela 2.2*** (os quatro primeiros tratamentos para os fatores *1* e *2*), percebe-se que os pares de tratamentos *1* e *2* diferem entre si apenas no nível do

fator *1*, permanecendo o fator *2* no nível (-). Os pares de tratamentos *3* e *4* também diferem entre si apenas no nível do fator *1*, permanecendo o fator *2* no nível (+). Nestes dois pares de tratamentos, as diferenças nos resultados (Y_2 - Y_1) e (Y_4 - Y_3) fornecem os efeitos ocasionados pela alteração dos níveis do fator *1*. Nota-se também que estes dois pares de tratamentos diferem-se por estar o fator *2* no nível (-) no primeiro par e no nível (+) no segundo par. Se as diferenças (Y_2 - Y_1) e (Y_4 - Y_3) forem idênticas (a menos do erro experimental), pode-se supor que não existe interação entre os fatores *1* e *2* porque a alteração no nível do fator *2* não causou nenhuma diferença nos resultados quando o fator *1* teve seus níveis alterados. Entretanto, se as diferenças entre os resultados (Y_2 - Y_1) e (Y_4 - Y_3) forem diferentes (a menos do erro experimental), é sinal de que os fatores *1* e *2* se interagem. Uma maneira de obter o efeito médio oriundo desta interação é fazer a diferença entre os pares (Y_2 - Y_1) e (Y_4 - Y_3) e dividir o resultado por dois (média das diferenças).

Tabela 2.2: Matriz de Planejamento para um Planejamento Fatorial 2^K genérico e suas interações.

Tratamento	*Interação de 1ª ordem*						*Interação de 2ª ordem*					*Interação de 3ª ordem*		...	*Int. de ordem K*	*Resposta média*
-	*1*	*2*	*3*	*4*	...	*K*	*12*	*13*	...	*1K*	...	*123*	...		*1234...K*	-
1	-	-	-	-		-	+	+		-		-			+ou-	$\overline{Y_1}$
2	+	-	-	-		-	-	-		+		+			+ou-	$\overline{Y_2}$
3	-	+	-	-		-	-	+		+		+			+ou-	$\overline{Y_3}$
4	+	+	-	-		-	+	-		-		-			+ou-	$\overline{Y_4}$
5	-	-	+	-		-	+	-		+		+			+ou-	$\overline{Y_5}$
6	+	-	+	-		-	-	+		-		-			+ou-	$\overline{Y_6}$
7	-	+	+	-		-	-	-		-		-			+ou-	$\overline{Y_7}$
8	+	+	+	-		-	+	+		+		+			+ou-	$\overline{Y_8}$
.	.	.	.	.	.	.		.		.		.			.	.
.	.	.	.	.	.	.		.		.		.			.	.
.	.	.	.	.	.	.		.		.		.			.	.
2^K	+	+	+	+		+	+	+		+		+			+	$\overline{Y}_{2^K}$

Para calcular as interações entre os fatores é necessário encontrar na Matriz de Planejamento os pares de tratamentos que apresentem as características acima citadas. Calcular todas as interações entre fatores de acordo com este procedimento não é um processo elementar. Porém, o cálculo dos efeitos das interações (de qualquer ordem) é muito fácil de ser obtido ao se transferir os sinais das colunas de interações para a coluna de resposta média (veja ***tabela 2.2***). O efeito de cada interação é obtido fazendo o somatório dos resultados positivos e negativos da coluna de resposta média dividido pela metade do número de tratamentos realizados. É interessante notar que metade dos resultados se encontram no nível (-) e a outra metade no nível (+). A ***expressão 1.4*** usada para calcular os efeitos principais dos fatores também pode ser usada para calcular os efeitos das interações de qualquer ordem, desde que sejam associados aos resultados de Y_n os sinais (+) ou (-) das respectivas interações que se deseja calcular.

Calculados os efeitos principais e os efeitos das interações, inicia-se a interpretação dos resultados obtidos, caso nenhuma replicagem do experimento tenha sido efetuada. Entretanto, como já foi mencionado, a grande maioria dos processos são susceptíveis a variabilidade. Logo, os resultados obtidos em um experimento onde a replicagem não tenha sido efetuada, trazem com eles, uma parcela que é devida a variabilidade inerente ao processo e que precisa ser identificada. Assim sendo, recomenda-se a replicagem do experimento com o objetivo de permitir que seja feita uma estimativa do erro experimental. Isso permitirá fazer uma interpretação mais precisa dos resultados. Caso o número de fatores a serem investigados seja, por exemplo, igual a *5* ou mais, o número de tratamentos do Planejamento Fatorial Completo começa a ficar muito grande, inviabilizando algumas vezes a replicagem do experimento. Nestes casos, pode-se usar as interações de ordem superior para se fazer uma estimativa do erro experimental. Uma demonstração dessa estimativa pode ser encontrada em **Montgomery (1984)**, **Box et al (1978)** e **Neto et al (1995)**.

2.6.2.3. Estimativa do Erro Experimental :

A replicagem do experimento permite fazer uma estimativa do erro experimental. Sendo a replicagem a responsável pela determinação do erro experimental, torna-se fácil perceber a sua importância. A replicagem deve, portanto, consistir em uma repetição autêntica de todas as etapas do processo em estudo, desde os preparativos que antecedem a experimentação até a obtenção dos resultados (inclusive). Vale lembrar que, para evitar que uma distorção estatística ocorra nos resultados, a experimentação deve ser realizada de forma aleatória. Como

mencionado anteriormente, a numeração dos tratamentos tem como único objetivo a sua identificação e, portanto, não significa que a experimentação seja realizada de acordo com os números de cada tratamento.

Com os resultados obtidos da repetição de um tratamento é possível obter uma estimativa do erro experimental deste tratamento. Como se trata de uma repetição autêntica e realizada de forma aleatória, é possível tomar a variância desses resultados como uma estimativa da variância devida aos erros aleatórios característicos do procedimento experimental adotado. Admitindo que em todo o espaço experimental a variância seja a mesma, podemos combinar as informações de todas as condições experimentais para estimá-la com um maior número de graus de liberdade. Assim, de maneira geral, se cada condição experimental for repetida r_i vezes e existindo 2^K tratamentos, a estimativa da variância experimental de todo o processo experimental é dada por (**Box et al - 1978**, **Montgomery - 1984**, **Neto et al**, **1995**):

$$s^2 = \frac{\left(\nu_1 s_1^2 + \nu_2 s_2^2 + \ldots + \nu_n s_n^2 + \ldots + \nu_{2^k} s_{2^k}^2\right)}{\left(\nu_1 + \nu_2 + \ldots \nu_{2^k}\right)} \qquad \textbf{(1.8)}$$

onde $\nu_n = r_i - 1$ é o número de graus de liberdade de S_n^2, a estimativa do *n-ésimo* tratamento. Esta formulação permite calcular a variância experimental de uma experimentação que possua diferentes números de repetições para cada um de seus tratamentos.

Calculando a raiz quadrada da ***expressão 1.8***, obtém-se uma estimativa com $(\nu_1 + \nu_2 + \ldots + \nu_2^K)$ graus de liberdade do erro experimental característico do processo experimental.

$$s = \left[\frac{\left(\nu_1 s_1^2 + \nu_2 s_2^2 + \ldots + \nu_n s_n^2 + \ldots + \nu_{2^k} s_{2^k}\right)}{\left(\nu_1 + \nu_2 + \ldots + \nu_{2^k}\right)}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad \textbf{(1.9)}$$

Segundo **Neto et al (1995)**, cada um dos efeitos calculados através da ***expressão 1.4*** é uma combinação linear dos resultados $\overline{Y_n}$ com coeficientes $a_n = 1/2^{(K-1)}$. Admitindo que todos os resultados obtidos são independentes e também de mesma variância (desde que a replicagem do experimento seja autêntica e os tratamentos tenham sido realizados de forma aleatória), tem-se que para variáveis independentemente distribuídas a variância da combinação linear é dada por:

$$\sigma_{\bar{Y}}^2 = \sum_{n=1}^{2^k}\left(a_n^2 * \sigma_n^2\right) \qquad \textbf{(1.10)}$$

ou, desenvolvendo a ***expressão 1.10*** chega-se a seguinte expressão:

$$\sigma_{\bar{Y}}^2 = a_1^2 * \sigma_1^2 + a_2^2 * \sigma_2^2 + \ldots + a_{2^k}^2 * \sigma_{2^k}^2 \qquad (1.11)$$

Como os σ_n's são admitidos iguais e $a_1 = a_2 = \ldots = a_2^K = a_n$ a ***expressão 1.11*** é alterada para:

$$\sigma_{\bar{Y}}^2 = 2^k * a_n^2 * \sigma^2 \qquad (1.12)$$

Lembrando que cada $\overline{Y_n}$ do experimento é a média de r resultados independentes, pode-se fazer $\sigma^2 = (\sigma/r)^2$ onde σ^2 é a variância de uma observação individual e r o número de repetições da experimentação. Usando a estimativa S^2 no lugar de σ^2, obtêm-se uma estimativa da variância experimental dos efeitos aqui proposta como:

$$s_{efeitos}^2 = 2^k * a_n^2 * \left(\frac{s}{r}\right)^2 \qquad (1.13)$$

A ***expressão 1.13*** é resultado de desenvolvimento deste trabalho e só pode ser usada para estimar o erro padrão dos efeitos quando todas as condições experimentais forem repetidas o mesmo número de vezes e nenhuma blocagem tiver sido realizada na experimentação.

2.7. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS:

Calculados o resultado médio $\overline{\overline{Y}}$ (***expressão 1.2***), os efeitos principal, os efeitos das interações (***expressão 1.4***) e o erro experimental dos efeitos ou erro padrão dos efeitos (***equação 1.13***), é possível iniciar a análise dos resultados com o objetivo de descobrir qual dos fatores estudados apresentam efeitos significativos nos resultados obtidos.

Como se conhece a o erro padrão dos efeitos, utilizou-se a distribuição de *Student* para decidir se os efeitos são ou não significativos. A distribuição de *Student* é definida pela expressão:

$$t_{(N-1)} = \frac{(\bar{x} - \mu)}{s/\sqrt{N}} \qquad \textbf{(1.14)}$$

onde:

⇒ $t_{(N-1)}$ representa uma distribuição t com N-1 graus de liberdade;

⇒ $(\bar{x}, s)$ são estimativas amostrais da média populacional μ e da variância populacional σ^2 obtidos em amostras aleatórias de N elementos cada uma;

⇒ N é o número de elementos na amostra.

Fazendo uma analogia, observa-se que N refere-se ao número de repetições (replicagem) realizada na experimentação. O número de graus liberdade é o resultado do somatório do número de graus de liberdade da variância de cada condição experimental, ou seja, $(N - 1) = \nu_1 + \nu_2 + ... + \nu_2^K$. O denominador $S/(N)^{(1/2)}$ é o erro padrão dos efeitos calculado pela ***expressão 1.13***.

Como mencionado anteriormente, um efeito será mais significativo quanto mais distante ele estiver do valor nulo, tanto para valores positivos como para valores negativos. Por enquanto sabe-se que quando um efeito de um fator ou interação for igual a zero (o que é muito difícil de ocorrer em função da variabilidade inerente a todo processo), os resultados da experimentação não serão influenciados pela alteração dos níveis deste fator, pelo menos na região de contorno estudada. Entretanto falta uma referência para decidir se um determinado valor encontrado para um efeito pode ser considerado ou não significativo (mesmo sendo este resultado próximo de zero).

Utilizando a distribuição t como referência, considera-se como significativos a um determinado nível de confiança, os efeitos que forem em valor absoluto superiores ao produto $t_{(N-1)} * [S/(N)^{(1/2)}]$.

Desse modo, escolhido um determinado nível de confiança e conhecido o número de graus de liberdade da experimentação, utiliza-se a tabela t **(anexo 1)** para determinar o valor de $t_{(N-1)}$. Multiplicando o valor encontrado na tabela pelo valor do erro padrão dos efeitos encontra-se um divisor de águas, ou seja, os efeitos que forem em valor absoluto inferiores ao resultado deste produto serão considerados não significativos e os que forem superiores, em valor absoluto, ao valor deste produto serão considerados significativos.

2.8. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS POR MEIO DO GRÁFICO NORMAL:

As conclusões obtidas na interpretação dos resultados poderão ser confirmadas através da utilização de gráficos normais.

Neto et al (1995) apresentam o gráfico normal da seguinte forma. Uma variável aleatória W distribuída segundo uma normal é representada graficamente por uma curva em forma de sino (***figura 2.2***). A distribuição de probabilidade acumulada é representada graficamente por uma sigmóide (curva em forma de s - ***figura 2.3***). Uma transformação na escala do eixo das ordenadas da função probabilidade acumulada pode transformar a sigmóide em uma reta.

O procedimento adotado para a transformação de uma distribuição de probabilidade acumulada de uma amostra aleatória de N elementos, extraídos de uma população normal em uma reta é definido pelo seguinte algoritmo:

- organize todos os n elementos em ordem crescente. Utilize um índice para indicar a ordem de cada elemento. Desse modo W_i deverá ser o menor dos elementos e W_N deverá ser o maior dos elementos;

- em função da aleatoriedade da amostra, podemos imaginar que cada um dos N elementos da amostra seja o representante de um intervalo e equivalente a $1/N$ da área total da distribuição. O primeiro elemento W_i representa o intervalo que vai de 0 a $1/N$, o segundo elemento W_2 representa o intervalo que vai de $1/N$ a $2/N$ e assim sucessivamente até chegar a W_N que representa o intervalo que vai de $(N - 1)/N$ a N/N;

- associe os pontos $W_1, W_2, \ldots\ldots, W_N$ ao centro de seus respectivos intervalos;

- marque estes pontos $W_1, W_2, \ldots\ldots, W_N$ em um papel de probabilidade normal. Espera-se que os pontos estejam alinhados segundo uma reta (***figura 2.4***) no caso de não existirem efeitos significativos.

Como os efeitos principal e os efeitos das interações são originários de uma experimentação aleatória normalmente distribuída, é possível obter o gráfico normal para os efeitos calculados.

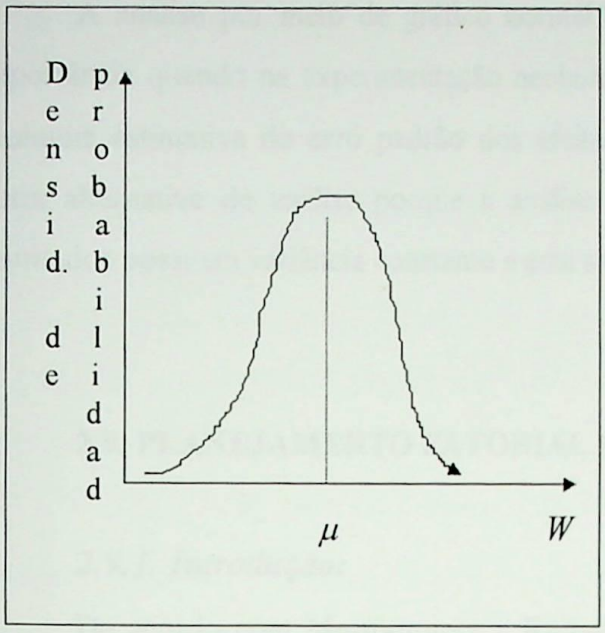


Figura 2.2: Gráfico da distribuição da densidade de probabilidade de uma distribuição normal.

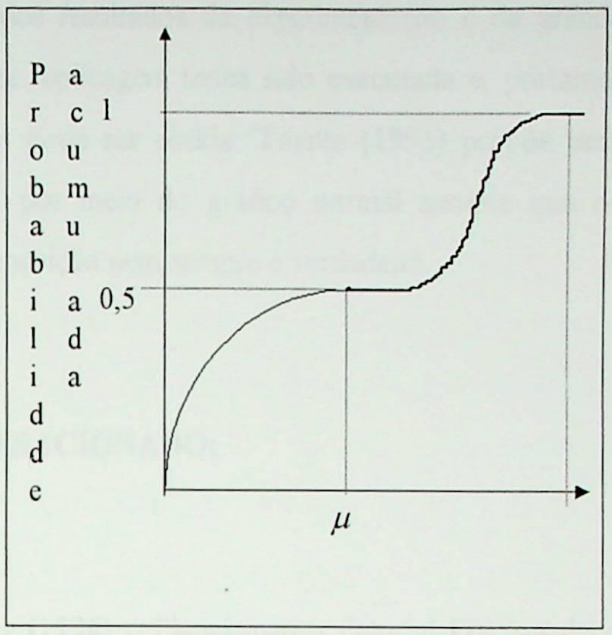


Figura 2.3: Gráfico da probabilidade acumulada de uma distribuição normal.

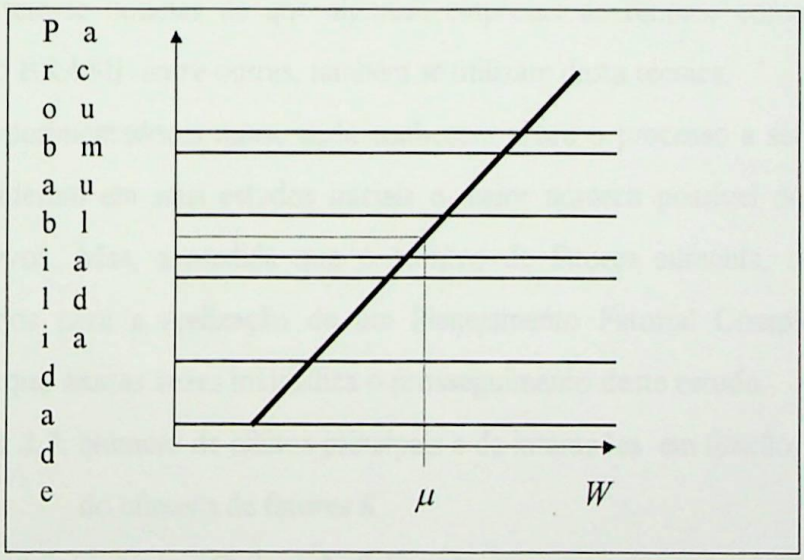


Figura 2.4: Gráfico da *figura 2.3* no papel de probabilidade normal.

Examinando o gráfico normal espera-se que todos os efeitos considerados não significativos se distribuam conforme uma reta, sendo que quanto menos significativo for o efeito, mais próximo ele deverá estar da reta e de sua região central. O contrário também é verdadeiro, ou seja, os efeitos considerados significativos não se distribuem conforme a reta encontrada e quanto mais significativo for um efeito, mais ele deverá estar afastado da reta e de sua região central.

A análise por meio de gráfico normal dos resultados da experimentação é de grande importância quando na experimentação nenhuma replicagem tenha sido executada e, portanto, nenhuma estimativa do erro padrão dos efeitos pode ser obtida. **Torres (1993)** propõe uma outra alternativa de análise porque a análise por meio do gráfico normal assume que os resultados possuem variância constante e esta suposição nem sempre é verdadeira.

2.9. PLANEJAMENTO FATORIAL FRACIONADO:

2.9.1. Introdução:

De acordo com **Montgomery e Runger (1996)** o Planejamento Fatorial Fracionado é utilizado em diversas empresas e estudos científicos. Eles afirmam que parte desta utilização é a facilidade com a qual tratamentos adicionais podem ser integrados a planejamentos fatoriais iniciais de baixa resolução com o objetivo de melhorar a informação sobre as interações entre os fatores. No Brasil tem-se notícias de que algumas empresas de renome como a IBM do BRASIL, XEROX do BRASIL entre outras, também se utilizam desta técnica.

Quando os experimentadores quase nada conhecem sobre o processo a ser estudado, é importante que considerem em seus estudos iniciais o maior número possível de fatores que julgam ser significativos. Mas, a medida que o número de fatores aumenta, o número de tratamentos necessários para a realização de um Planejamento Fatorial Completo aumenta consideravelmente, o que muitas vezes inviabiliza o prosseguimento deste estudo.

Tabela 2.3: Número de efeitos principais e de interações em função do número de fatores *K*.

	Ordem da interação							
K	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	**Total**
2	2	1	-	-	-	-	-	**3**
3	3	3	1	-	-	-	-	**7**
4	4	6	4	1	-	-	-	**15**
5	5	10	10	5	1	-	-	**31**
6	6	15	20	15	6	1	-	**63**
7	7	21	35	35	21	7	1	**127**

A ***tabela 2.3*** permite extrair algumas observações importantes:

- a medida que o número K de fatores aumenta, o número de interações de ordem mais elevada aumenta consideravelmente;

- o número total de efeitos (efeitos principal e efeitos das interações) de um projeto fatorial completo que contém K fatores é sempre igual a $(2^K - 1)$, ou seja, é sempre igual ao número total de tratamentos menos *1*.

A observação anterior permite visualizar que quando se estima o resultado da média global $\bar{\bar{Y}}$, dos efeitos principal e das interações, o que se busca é a resolução de um sistema com um mesmo número de equações e variáveis.

Como exemplo imagine o que ocorre com um Planejamento Fatorial Completo 2^2: tem-se *4* tratamentos e *4* variáveis a serem determinadas que são: $\bar{\bar{Y}}$, E_1, E_2 (efeitos principal), E_{12} (efeito da interação entre os fatores *1* e *2*).

Fazendo uma interpretação destas observações encontra-se uma alternativa para a solução do problema que é estudar o maior número possível de fatores com uma menor quantidade de tratamentos, ou seja, ao invés de se executar o Planejamento Fatorial Completo o que se pretende é executar parte ou fração deste planejamento.

Como já foi mencionado, os efeitos das interações de ordem mais elevada possuem valores pequenos que em geral são muitas vezes destituídos de qualquer significado. Desta forma, não é necessário executar todos os tratamentos previstos em um Planejamento Fatorial Completo pois, se os efeitos das interações de ordem mais elevada forem considerados desprezíveis, não será preciso estimá-los.

Além disso, quando o número de fatores aumenta, as chances de que um ou mais fatores não afete significativamente os resultados também aumenta. Novamente, não será preciso estimar os efeitos de todos os fatores.

Logo, conclui-se que é possível reduzir o número de tratamentos de um Planejamento Fatorial Completo, pois é possível diminuir (deve-se entender diminuir como agrupar) o número de efeitos a serem estimados. Consequentemente poderão ser estimados somente os efeitos dos fatores e interações que se julgarem significativos. O procedimento utilizado para determinação do número de tratamentos a serem realizados é obtido através do conceito de meia fração. Como o próprio nome sugere, a redução do número de tratamentos do Planejamento Fatorial

Completo pode ser de 50%, isto é, a metade do Planejamento Fatorial Completo, podendo também ser de 1/4, 1/8, 1/16,..... até o limite de se atingir a saturação da experimentação onde não se consegue mais reduzir o número de tratamentos em função de não se conseguir investigar os efeitos dos fatores envolvidos na experimentação.

2.9.2. Obtenção da Fração:

A fração obtida de um Planejamento Fatorial Completo 2^K é um subconjunto deste planejamento escolhido da seguinte forma:

- dado um Planejamento Fatorial 2^K é possível obter deste uma fração que será chamada de Planejamento Básico 2^{K-P} (apesar de não ser definido na **ISO 3534/3**, na literatura clássica as frações ou tratamentos adicionais que são acrescidos ao Planejamento Básico são conhecidos por *foldovers*) onde P determina a fração da experimentação que se deseja obter. Assim como K, P representa os fatores da experimentação. Os valores permitidos a P variam de 1 até um determinado valor (valor este é óbvio menor do que K) onde a saturação da experimentação é atingida. Desse modo tem-se que quando $P = 1$, a experimentação é reduzida à metade; quando $P = 2$, a experimentação é reduzida à $1/4$ e assim sucessivamente.

Obtido o Planejamento Básico, deve-se acrescentar a ele as colunas referentes aos P's fatores que foram retirados do planejamento fatorial completo. Para acrescentar estas colunas é necessário definir os níveis (+ ou -) para estes fatores nos tratamentos. Isto é feito através da relação ou relações geradora que se define(m) para a experimentação.

2.9.3. Relações Geradoras:

O Planejamento Básico 2^{K-P} fornece 2^{K-P} graus de liberdade que permitem estimar 2^{K-P} *contrastes* (o termo *contraste* é definido pela **ISO 3534/3** com o sentido de efeito e será usado para diferenciar o efeito estimado no Planejamento Fatorial Completo do efeito estimado no planejamento fatorial fracionado que será representado pela letra L). O Planejamento Básico 2^{K-P} consome $(K - P + 1)$ graus de liberdade ($(K - P)$ fatores e a média global $\overline{\overline{Y}}$). Portanto, existem $[2^{K-P} - (K - P + 1)]$ graus de liberdade que estão sobrando. Na verdade estes graus de liberdade são referentes as interações dos fatores do Planejamento Básico 2^{K-P}. Utilizando de um artifício matemático, substitui-se algumas colunas de interações (usando todas o planejamento será dito saturado) do Planejamento Básico 2^{K-P} por colunas dos P's fatores que não fazem parte do Planejamento Básico 2^{K-P}. Para isto é preciso que se defina quais os níveis (+ ou -) de cada um

dos *P's* fatores nos tratamentos. A maneira de se fazer isto é através da relação geradora que é uma combinação dos fatores que não fazem parte do Planejamento Básico com aqueles que fazem. Como exemplo, supôs-se um processo onde existiam *5* fatores (*1*, *2*, *3*, *4*, *5*). Supôs-se também que o planejamento será fracionado e que os fatores *4* e *5* não farão parte do Planejamento Básico 2^{K-P}. Como já foi mencionado, é preciso acrescentar ao Planejamento Básico as colunas *4* e *5*. Assim, deve-se definir duas relações geradoras. Uma para a coluna (fator) *4* e a outra para a coluna (fator) *5*. Adota-se que o nível do fator *4* será definido pelo produto dos sinais dos fatores *1*, *2*, *3*, e o nível do fator *5* pelo produto dos sinais dos fatores *1* e *2*. Assim tem-se:

$$4 = 1 * 2 * 3$$

$$5 = 1 * 2$$

A primeira conseqüência desse procedimento é tornar idêntico os contrastes (efeitos) L_4 e L_{123}, L_5 e L_{12} já que eles são determinados pelos mesmos sinais. Estas duas relações definem as demais identidades do Planejamento Fracionado 2^{K-P} e podem ser facilmente obtidas através de suas relações geradoras. Para se obter as relações geradoras são utilizadas duas particularidades da multiplicação das colunas de sinais. A primeira é que a multiplicação de uma coluna por ela mesma sempre resultará em uma coluna que conterá só sinais positivos. Essa coluna onde só existem sinais positivos quando aplicada a outra coluna qualquer tem a propriedade de não alterá-la. Assim, a multiplicação de uma coluna por ela mesma fornece como resultado uma coluna chamada de identidade (*I*). A outra particularidade é que as propriedades associativa e comutativa também podem ser aplicadas.

Com base nestas duas propriedades é possível obter as relações geradoras. Basta multiplicar as relações adotadas pelos fatores que permitem obter a coluna identidade no lado esquerdo das relações. Logo:

$$4 = 1 * 2 * 3 \Rightarrow 4 * 4 = 1 * 2 * 3 * 4 \Rightarrow I = 1 * 2 * 3 * 4$$

$$5 = 1 * 2 \Rightarrow 5 * 5 = 1 * 2 * 5 \Rightarrow I = 1 * 2 * 5$$

As demais relações entre os vários contrastes são obtidas pelas duas relações geradoras acima. Alguns exemplos são apresentados:

$I * 1 = 1 * 1 * 2 * 3 * 4$; $1 = 2 * 3 * 4$ $\qquad$ $I * 1 = 1 * 1 * 2 * 5$; $\quad 1 = 2 * 5$

$I * 2 = 1 * 2 * 2 * 3 * 4$; $2 = 1 * 3 * 4$ $\qquad$ $I * 2 = 1 * 2 * 2 * 5$; $\quad 2 = 1 * 5$

$I * 3 = 1 * 2 * 3 * 3 * 4$; $3 = 1 * 2 * 4$ $\qquad$ $I * 3 = 1 * 2 * 3 * 5$; $\quad 3 = 1 * 2 * 3 * 5$

Obtendo as demais relações, é possível descobrir todos os contrastes que são idênticos. A ***tabela 2.4*** apresenta todas estas identidades.

Tabela 2.4: Relação entre os contrastes do Planejamento Básico 2^{5-2} e os efeitos do Planejamento Fatorial Completo 2^5.

Relações entre as colunas de sinais	Contrastes confundidos nos efeitos do planejamento fatorial 2^5
$I = 234 = 25 = 1345$	$L_1 \rightarrow 1 + 234 + 25 + 1345$
$2 = 134 = 15 = 2345$	$L_2 \rightarrow 2 + 134 + 15 + 2345$
$3 = 124 = 1235 = 45$	$L_3 \rightarrow 3 + 124 + 1235 + 45$
$4 = 123 = 1245 = 35$	$L_4 \rightarrow 4 + 123 + 1245 + 35$
$5 = 12345 = 12 = 34$	$L_5 \rightarrow 5 + 12345 + 12 + 34$
$13 = 24 = 235 = 145$	$L_{13}=L_{24}=L_{235}=L_{145} \rightarrow 13 + 24 + 235 + 145$
$14 = 23 = 245 = 135$	$L_{14}=L_{23}=L_{245}=L_{135} \rightarrow 14 + 23 + 245 + 135$
$I = 1234 = 345$ $I = 125 = 345$	$L_I = \bar{\bar{Y}} + 0{,}5 * (1234 + 125)$

A ***tabela 2.4*** mostra que as relações geradoras possuem a propriedade de confundir ou misturar os efeitos do Planejamento Fatorial Completo nos contrastes do Planejamento Fatorial Fracionado, isto é, os efeitos principal são confundidos com os efeitos das interações e as interações também confundem-se entre si nos contrastes. A composição ou formação dos contrastes que se obteve são decorrentes das relações geradora adotadas. Outras relações geradoras poderiam ter sido adotadas, o que obviamente resultaria em contrastes de composição diferentes. A escolha da relação ou relações geradoras definem também a resolução do planejamento fatorial fracionado.

2.9.4. Resolução da Experimentação:

Pode-se observar que a relação geradora define quais os efeitos que irão compor os contrastes. Dessa forma é possível determinar qual a composição dos contrastes, ou seja, quais efeitos se desejam confundir. Dependendo da relação geradora adotada, define-se a resolução da experimentação. A resolução é igual ao número de fatores que compõe a relação geradora. No exemplo apresentado a relação geradora $I = 1234$ é de resolução 4 e a relação geradora $I = 125$ é de resolução 3. Nos casos em que mais de uma relação geradora estiver presente no

Planejamento Fatorial Fracionado, a resolução da experimentação será definida pela menor das resoluções. Portanto, o exemplo é de resolução *3*.

2.9.5. Construção e Análise do Planejamento Fatorial Fracionado:

A construção do Planejamento Fatorial Fracionado pode ser feita segundo o seguinte algoritmo proposto:

- identifique os fatores que podem interferir nos resultados da experimentação;
- determine o número de experimentos que você poderá executar;
- defina o valor de *P*;
- escolha os *P's* fatores que não farão parte do planejamento básico;
- determine as relações geradoras para cada um dos *P's* fatores;
- construa o planejamento fatorial básico;
- acrescente as colunas dos *P's* fatores definidos pelas relações geradora.

Construído e executado o Planejamento Fatorial Fracionado, a análise da experimentação segue o mesmo procedimento usado no Planejamento Fatorial Completo. Estima-se os contrastes de todas as colunas e o erro experimental dos contrastes. Se o planejamento fracionado é não saturado, ou seja, se uma ou mais interações do planejamento básico não foi usada para definir uma relação geradora, graus de liberdade estarão disponíveis para estimativas de contrates. Isto significa que é possível estimar os contrastes relativos a estes graus de liberdade. Para isto basta acrescentar ao planejamento fracionado construído as colunas das interações do planejamento básico que não foram usadas na definição das relações geradoras. No exemplo, as interações do planejamento básico são: *12*, *13*, *23* e *123*. A primeira e a última interações foram usadas na definição das relações geradoras $I = 125$ e $I = 1234$ respectivamente. Logo, ao planejamento fracionado construído é possível acrescentar as

colunas das interações *13* e *23*. Com o auxílio do teste de Student identifica-se quais os contrastes são considerados significativos. Vale lembrar que uma análise mais cuidadosa deverá ser feita, pois, os contrastes são efeitos que se encontram agora confundidos (misturados).

2.9.6 . Comentários Gerais:

Até o presente momento verificou-se que é possível reduzir o número de tratamentos de uma experimentação em função das razões já mencionadas. Alguns comentários adicionais são apresentados com o objetivo de explorar um pouco mais o assunto. São eles:

- Observou-se que as relações geradoras são as responsáveis pela resolução da experimentação. O uso da maior resolução possível em um Planejamento Fatorial Fracionário tem como conseqüência a formação de contrastes que confundem (misturam) os efeitos principal com as interações de ordem mais elevada. Esta característica pode fornecer boas aproximações dos valores dos efeitos principal calculados no Planejamento Fatorial Completo. Caso algum dos contrastes seja considerado significativo, é muito provável que esta significância ocorra devido ao efeito principal que compõe este contraste. Entretanto, esta política de confundir os efeitos principais com as interações de ordem mais elevada pode apresentar alguns inconvenientes por também formar contrastes que confundem os efeitos das interações de ordem intermediária. Caso algum destes contrastes formados pelas interações intermediárias seja considerado significativo, a identificação da parcela (interação) responsável por esta significância não é tão imediata. Uma análise conjunta de todos os contrastes do Planejamento Fatorial Fracionado pode ajudar a identificar a parcela responsável por esta significância. Se dúvidas ainda restarem após esta análise, recomenda-se a construção de um novo planejamento onde as interações de ordem intermediária não estejam confundidas (pelo menos no contraste onde não foi possível se fazer a identificação) ou que sejam acrescidos tratamentos que permitam quebrar o contraste em suas parcelas. A adição de tratamentos adicionais (*foldovers*) pode ser feita por duas regras apresentadas por **Montgomery e Runger (1996)**. Outra forma de resolver esta questão e recorrer a fração da experimentação que foi eliminada, ou seja, realizar o Planejamento Fatorial Completo ou a adição de todos os tratamentos possíveis em um *foldover* (*complete foldover design*). Se os experimentadores de alguma forma suspeitarem que algumas interações são significativas e desejarem estimá-las separadamente, um método gráfico proposto por **Wu** e **Chen (1992)** que se baseia nos gráficos lineares de Taguchi poderá ser empregado.

- Observou-se também que é o valor de P que determina a fração e o número de relações geradoras a serem usadas. Para $P = 1$ a experimentação é reduzida à metade e usa-se apenas uma relação geradora. Para $P = 2$ a experimentação é reduzida a $1/4$ e usam-se duas relações geradora. Para $P = 3$ a experimentação é reduzida à $1/8$ e usam-se três relações geradora e assim sucessivamente. Desejando-se executar o Planejamento Fatorial Completo basta acrescentar as frações que foram retiradas do Planejamento Fatorial Fracionado. Para $P = 1$ acrescenta-se a metade da experimentação, para $P = 2$ acrescenta-se $3/4$ da experimentação, para $P = 3$ acrescenta-se $7/8$ da experimentação e assim sucessivamente. A obtenção destas frações é feita a partir das relações geradora e suas inversas. No exemplo, as relações geradora são $I = 1234$ e $I = 125$. Suas inversas são $I = -1234$ e $I = -125$ respectivamente. No exemplo usou-se apenas $1/4$ do Planejamento Fatorial Completo; os $3/4$ restantes deverão ser obtidos por uma combinação das relações geradoras e suas inversas. As frações restantes são obtidas pelas combinações $I = -1234$ e $I = -125$, $I = -1234$ e $I = 125$, $I = 1234$ e $I = -125$.

- Do mesmo modo que a relação geradora, a inversa também confunde ou mistura os efeitos do Planejamento Fatorial Completo. Ao contrário da relação geradora onde os contrastes são estimativas da soma entre os efeitos do Planejamento Fatorial Completo, os contrastes estimados pelas inversas são diferenças entre os efeitos do Planejamento Fatorial Completo. No exemplo, as relações geradoras $I = 1234$ e $I = 125$ definem o contraste L_1 como sendo a soma dos efeitos 1, 234, 25 e 1345. As relações geradora $I = -1234$ e $I = -125$, $I = -1234$ e $I = 125$, $I = 1234$ e $I = -125$ definem respectivamente os contrastes L_1', L_1'' e L_1''' (o expoente linha é usado para identificar as frações) que são apresentados:

$$L_1' = 1 - 234 - 25 + 1345 \quad L_1'' = 1 - 234 + 25 - 1345 \quad L_1''' = 1 + 234 - 25 - 1345$$

- Cada um dos grupos de relações geradora ($I = -1234$ e $I = -125$, $I = -1234$ e $I = 125$, $I = 1234$ e $I = -125$) define as demais frações que também poderiam ser usadas para estimar os efeitos do Planejamento Fatorial Completo.
- A soma dos contrastes referentes a cada um dos efeitos das frações deverá produzir o mesmo resultado do Planejamento Fatorial Completo. Por exemplo, somando-se as estimativas L_1, L_1', L_1'' e L_1''' tem-se:

$$L_1 = 1 + 234 + 25 + 1345$$

$$L_{,}' = 1 - 234 - 25 + 1345$$

$$L_{,}'' = 1 - 234 + 25 - 1345$$

$$L_{,}''' = 1 + 234 - 25 - 1345$$

$$L_{,} + L_{,}' + L_{,}'' + L_{,}''' = 1 + 1 + 1 + 1$$

$$1 = (L_{,} + L_{,}' + L_{,}'' + L_{,}''')/4$$

Como era de se esperar, o *efeito 1* (*EI*) é a média dos contrastes $L_{,} + L_{,}' + L_{,}'' + L_{,}'''$.

- O número de efeitos que compõe um contraste depende da fração da experimentação usada. Este número é resultado da divisão do número de experimentos do Planejamento Fatorial Completo pelo número de experimentos do Planejamento Fatorial Fracionado. O resultado desta divisão pode ser obtido pela expressão:

$$N_{ec} = \frac{2^k}{2^{k-p}} \qquad \textbf{(1.15)}$$

onde N_{ec} é o número de efeitos que compõe o contraste.

- Os fatores considerados não significativos são fatores inertes, ou seja, a mudança de nível dessas variáveis não tem efeito significativo na resposta e portanto podem ser desconsiderados no estudo, pelo menos na região (níveis) estudada.

- Os planejamentos fatoriais fracionados possuem uma notação característica. A notação, por exemplo, 2_V^{5-1} significa que o planejamento fatorial completo de *5* fatores é reduzido a metade ($P = 1$) e é de resolução 5 (indicado pelo algarismo romano *V* no índice).

CAPÍTULO 3
CORTE POR PLASMA

3.1. INTRODUÇÃO:

O Corte por Plasma (*Plasma Arc Cutting*) é um processo térmico usado para cortar materiais eletricamente condutores. O Oxi-corte (*Oxy-fuel Gas*) , o Corte a Laser (*Laser Beam Cutting*) e o Corte por Feixe de Elétrons (*Electrom Beam Cutting*) são outros tipos de processos térmicos de corte que também estão disponíveis para a manufatura. A escolha do processo térmico de corte a ser usado dependerá de considerações como o tamanho da chapa, disponibilidade de espaço, volume de produção, qualidade desejada e o investimento financeiro para a aquisição do equipamento de corte **(Polacek, 1992)**. **Lucas** e **Rennie (1993)** apontam além dessas, considerações como: o tipo e espessura do material e o tamanho do corte.

Dentre todos os cortes citados, o Oxi-corte é o mais antigo , sendo criado por Ernest Wiss por volta de 1900 (**Graham, 1990**). A aplicação limitada do Oxi-corte e a pequena possibilidade de aumento da velocidade de corte (segundo **Graham, 1990**, um pequeno mas definitivo aumento na velocidade de corte é esperado), aliado ao desenvolvimento de novos materiais, sobretudo para a indústria aeroespacial após a Segunda Guerra Mundial, e a dificuldade de atender as especificações de projeto, fizeram com que outros processos térmicos de corte, como os citados, fossem criados.

Neste cenário, segundo **Benedict (1987)**, plasma a alta temperatura foi pela primeira vez considerado para aplicações de corte quando, em 1950, foi descoberto que o arco do processo TIG (*Tungsten Inert Gas*) de soldagem poderia ser confinado para produzir um plasma muito quente que seria então usado para o corte. O Processo de Corte por Plasma foi introduzido na indústria em 1955 para cortar o alumínio e o aço inoxidável. Todavia ele não foi amplamente aceito até 1970 quando novos processos melhoraram a qualidade do corte (**Hypertherm, Inc., 1978, apud Benedict, 1987**).

O Processo de Corte por Plasma pode ser aplicado em muitos materiais eletricamente condutores. Entretanto, a maioria das aplicações são para o aço carbono, aço inoxidável e o alumínio. Uma comparação entre o Corte a Laser, o Oxi-corte e o Corte por Plasma é feito através da ***figura 3.1*** onde são levados em consideração a velocidade de corte e a espessura a ser cortada.

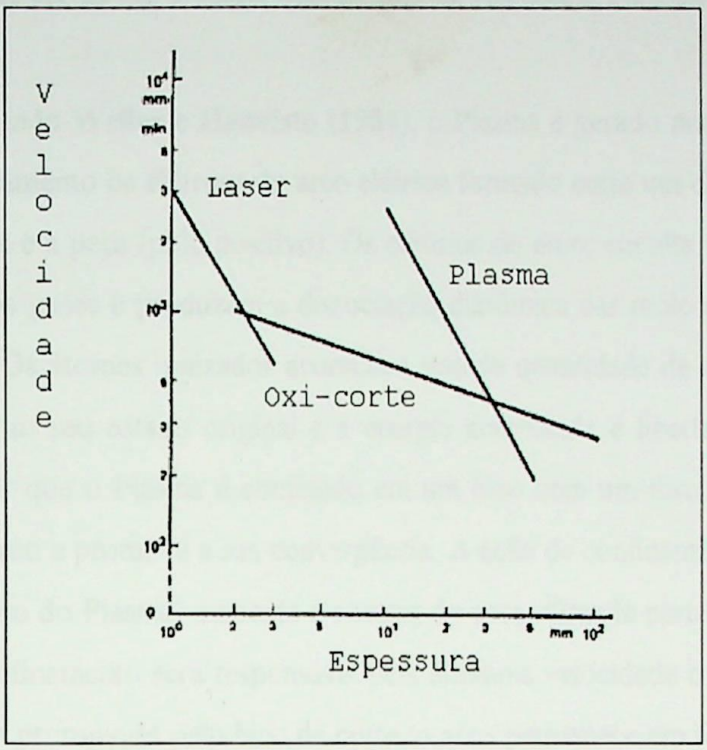


Figura 3.1: Comparação entre o Corte por Plasma, Oxi-corte e o Corte a Laser. Fonte: Messer e Griesheim.

Observa-se que o Laser é aplicado tipicamente a materiais de pequena espessura. O desenvolvimento do Processo de Corte por Plasma tem permitido a competição com o Laser, conforme afirma **Irving (1992)** em seu artigo "*High-tolerance Plasma Arc Cutting Carves out Some Niches in Iindustry*". Segundo ele *High-tolerance Plasma Arc Cutting* é um processo que se encontra entre o corte a Laser e o corte convencional por Plasma. De acordo com **Lucas** e **Rennie (1993)**, a velocidade de corte do *High-tolerance Plasma Arc Cutting* é significativamente mais baixa que a do corte por Plasma convencional e atinge de 60 a 80% da velocidade do corte a Laser, sendo que a qualidade do corte está entre a qualidade do corte por Plasma convencional e o corte a Laser.

Verifica-se também que o Corte por Plasma e o Oxi-corte se aplicam a espessuras similares, sendo a velocidade de corte do plasma superior para espessuras na faixa de 5 a 30 mm e a velocidade do Oxi-corte superior para espessuras maiores que 30 mm. Para **Goodwin (1989)**, o Processo de Corte por Plasma, na faixa de espessura entre 3 e 25 mm, é o que pode oferecer uma maior vantagem econômica. Em geral, a velocidade de corte do Plasma é de 5 a 8 vezes superior a velocidade do Oxi-corte (**Benedict, 1987**). Para **Polacek (1992)** esta

diferença pode ser de até 6 vezes, dependendo da espessura. Para **Graham (1990)** ela varia de 4 a 6 vezes.

Segundo **Weller** e **Haavisto (1984)**, o Plasma é gerado por submeter um fluxo de gás ao bombardeamento de elétrons do arco elétrico formado entre um eletrodo (polo negativo) que fica na pistola e a peça (polo positivo). Os elétrons do arco, em alta velocidade, colidem com as moléculas dos gases e produzem a dissociação diatômica das moléculas seguida pela ionização dos átomos. Os átomos ionizados acumulam grande quantidade de energia. Ao tocar a peça, o átomo volta ao seu estado original e a energia acumulada é libertada. Através da ***figura 3.2*** pode-se notar que o Plasma é confinado em um bico com um furo de pequeno diâmetro. Isto estabiliza o arco e promove a sua convergência. A ação de confinamento (que tem por finalidade a concentração do Plasma) aumenta a energia do arco. Grande parte do aquecimento do gás na região de confinamento será responsável pela altíssima velocidade do jato de plasma. Devido o confinamento promovido pelo bico de corte, o arco permanece em forma de coluna, divergindo ligeiramente até que atinja a peça.

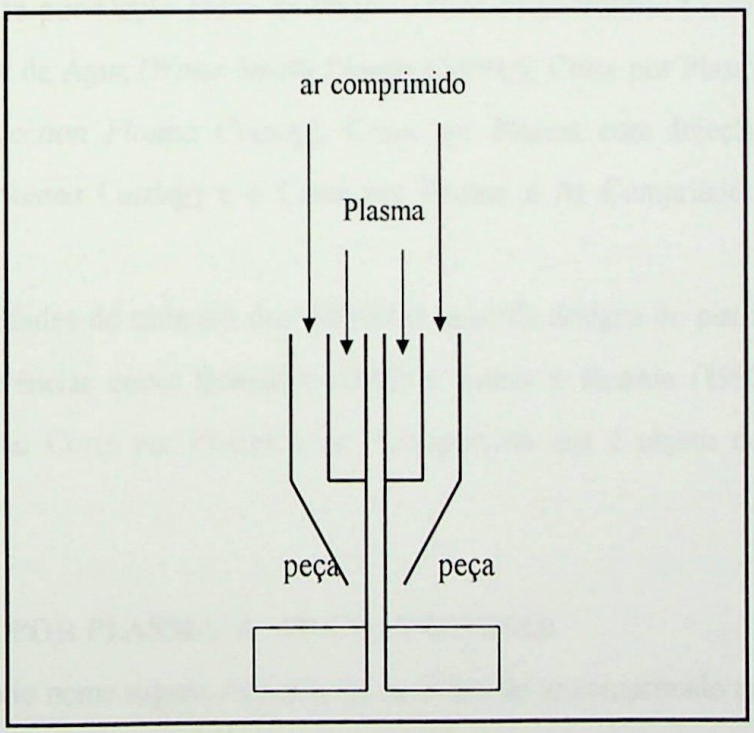


Figura 3.2: Descrição da tocha para corte por Plasma.

0 Plasma pode atingir temperaturas de até *33.000* ° C possibilitando assim que os metais sejam cortados em espessuras que normalmente variam de 3 a 150 mm. O seu comportamento único é o bastante para considerá-lo o quarto estado da matéria (**Benedict, 1987**). O desenvolvimento de novos designs de pistolas, como por exemplo, o sistema de corte

por plasma com injeção de água, permite que a temperatura do plasma esteja próxima de *50.000* °C , que é aproximadamente nove vezes a temperatura da superfície do sol **(Lindberg, 1990)**.

Em resumo, poderia se dizer que o Processo de Corte por Plasma envolve corte por fusão e vaporização associado a expulsão do material fundido pela energia cinética do gás de plasma **(Weller e Haavisto, 1984)**.

Os equipamentos típicos de uma unidade de corte por plasma são: fonte de energia, fornecimento de gás, sistema de refrigeração, unidade de controle e a pistola de plasma. Outros importantes itens para um sistema completo inclui um controlador de velocidade para a pistola ou peça e um sistema de exaustão para a fumaça gerada.

Através dos anos muitos diferentes tipos de design de pistola tem sido introduzidos no mercado. Esses diferentes designs influenciam diretamente na qualidade de corte desejada. Estas variações tem basicamente por origem o tipo de proteção da região de corte e concentração do jato de plasma (**Weller e Haavisto, 1984**). Em função desta variações foram desenvolvidos o Corte por Duplo Fluxo de Plasma (*Dual Flow Plasma Cutting*), Corte por Plasma com Proteção de Água (*Water Shield Plasma Cutting*), Corte por Plasma com Injeção de Água (*Water Injection Plasma Cutting*), Corte por Plasma com Injeção de oxigênio (*Oxygen Injection Plasma Cutting*) e o Corte por Plasma a Ar Comprimido (*Air Plasma Cutting*).

As particularidades de cada um dos diferentes tipos de designs de pistolas podem ser encontradas em referências como **Benedict (1987)** e **Lucas** e **Rennie (1993)** . Particular atenção será dada ao Corte por Plasma a Ar Comprimido que é objeto de estudo deste trabalho.

3.2. CORTE POR PLASMA A AR COMPRIMIDO:

Como o próprio nome sugere, este sistema se utiliza do ar comprimido para a formação do gás de plasma além também de desempenhar a função de refrigeração da pistola. A ***figura 3.3*** mostra em detalhes a construção típica de uma pistola a ar comprimido. Observa-se que o bico de corte feito de metal permanece exposto bem próximo da peça a ser cortada. Com este design, é possível por eletricidade abrir o arco do eletrodo para o bico de corte e então do bico de corte para a peça. Este indesejável arco é conhecido como duplo arco e é a principal causa de falha prematura do bico de corte.

A percentagem de oxigênio no ar age para manter a queima exotérmica do metal e permite velocidades de corte elevadas para materiais oxidáveis como o aço carbono. Outros materiais como o alumínio podem ser cortados, mas o corte apresenta elevada oxidação. Por causa do pequeno grau de confinamento conferido ao plasma, o corte exibe um alto grau de conicidade com arredondamento.

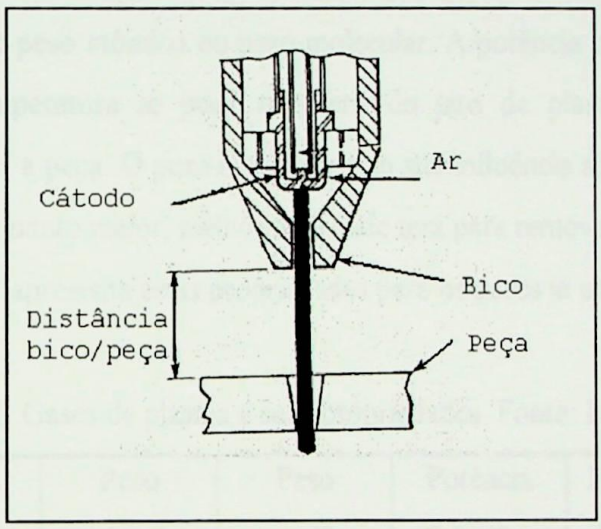


Figura 3.3: Construção típica de uma pistola de plasma a ar comprimido. Fonte: Welding and Metal Fabrication (abril, 1993).

Diferentes dos outros sistemas, o eletrodo de tungstênio não pode ser usado devido a elevada temperatura e a presença de oxigênio. Portanto eletrodos de zircônio ou háfnio são usados em função de suas superiores resistência à oxidação. Todavia mesmos com estes materiais , a vida média dos eletrodos é muito reduzida comparativamente aos outros tipos de designs.

Segundo **Lucas** e **Rennie (1993)**, o uso do ar comprimido ao invés de gases mais caros, faz com que este sistema seja altamente competitivo com o Oxi-corte. A vantagem de usar ar ao invés de gases mais caros pode ser anulada pela necessidade de se fornecer ar ao sistema em pressões relativamente elevadas e limpo, elevando-se assim o custo de implantação do sistema. Segundo os autores, a vida útil do eletrodo e do bico de corte são severamente reduzidas com freqüentes liga/desliga, ou seja, freqüentes abertura e interrupção do arco.

3.3. INFLUÊNCIA DOS GASES:

Existem hoje, comercialmente conhecidos, como gases de plasma, o argônio, o hidrogênio e o nitrogênio. Além da combinação destes, utiliza-se também o ar.

O argônio foi usado com gás de arco no inicio do desenvolvimento do Processo de Corte por Plasma porque ele não requeria uma voltagem inicial tão elevada quanto outros gases requeriam. O uso do argônio como gás de plasma produziu cortes aceitáveis sobre o alumínio, embora a velocidade de corte fosse baixa. Essa baixa velocidade era resultado do baixo calor específico do argônio (**Severance** e **Anderson, 1984**).

Dois critérios são usados para selecionar um gás ou uma mistura de gases que são: potência calorífica e peso atômico ou peso molecular. A potência calorífica serve para indicar quanto de alta temperatura se pode transferir do jato de plasma para a peça, ou seja, capacidade de fundir a peça. O peso molecular tem sua influência sobre o impulso sofrido pelo jato de plasma que quanto maior, melhor facilidade terá para remover o metal fundido da peça.

A ***tabela 3.1*** apresenta estas propriedades para os gases já citados:

Tabela 3.1: Gases de plasma e suas propriedades. Fonte: Messer e Griesheim.

Gás	Peso molecular	Peso específico (g/cm^3)	Potência Calorífica ($w/cm\ ^{o}C$)	Energia de ionização (ev)	Tipo de gás
A_r	40	1,78	baixa	15,7	inerte
H_2	2	0,09	alta	15,4	redutor
N_2	28	1,25	média	15,8	
AR	-	1,30	média	-	oxidante

O gás de argônio compensa sua baixa potência calorífica com seu elevado peso molecular, sendo então indicado para corte a baixas velocidades de chapas finas, apesar de seu elevado custo.

A vantagem do gás de hidrogênio é a alta potência calorífica, permitindo alta velocidade de corte com boa qualidade. Porém, seu baixo peso molecular obriga-o a se combinar com o argônio e o nitrogênio (80% H_2 + 20% A_r , 75% H_2 + 25% N_2), melhorando assim sua eficiência na remoção do metal fundido. É próprio para espessuras maiores, é explosivo, produz uma superfície de corte lisa e um excessivo desgaste do diâmetro do bico de corte.

No caso do gás de nitrogênio, sua média potência calorífica, aliada ao seu considerável peso molecular, torna-o bastante interessante para formar o gás de plasma. Como desvantagem tem a grande formação de fumaça e óxido de nitrogênio que necessitam ser aspirados, sendo indicado para espessuras menores. Apresenta excessivo desgaste do diâmetro do bico de corte, qualidade de corte insatisfatória e menores velocidades de corte. Uma alternativa de utilização do nitrogênio é a sua mistura com o oxigênio (78% N_2 + 21% O_2). O rendimento térmico é aumentado já que é adicionado o calor gerado na reação de oxidação do metal de corte. Desta forma a velocidade de corte pode ser aumentada, sendo que neste caso pode se situar na faixa de 1,5 a 2 vezes a velocidade de corte com nitrogênio puro. Gases ativos como o oxigênio aumentam o calor, melhoram a velocidade de corte e reduzem a quantidade de energia necessária para o processo (**Weller** e **Haavisto, 1984**).

Considerando ainda a influência dos gases de plasma, **Severance** e **Anderson (1984)**, analisaram o efeito da alteração do gás de plasma e gás de proteção na velocidade de corte e na qualidade do corte para o alumínio, aço inoxidável e aço carbono. Algumas observações e conclusões por eles realizadas são apresentadas a seguir:

- Uma das misturas mais comuns de gases no Processo de Corte por Plasma é a composição de 35% de hidrogênio e 65% de argônio. Nesta mistura, o hidrogênio que é um gás diatômico é usado para melhorar a transferência de calor. O argônio é usado por requerer uma menor voltagem para a formação do arco e para aumentar o peso molecular médio da mistura. A vida do eletrodo é aumentada se a composição for alterada para 65% de hidrogênio e 35% de argônio. Todavia, freqüentemente o nitrogênio é preferido em função de seu menor custo.

- Pequenas quantidades de hidrogênio adicionadas ao nitrogênio melhoram a aparência de corte do aço carbono, mas grandes quantidades de hidrogênio produzem bolhas de escória, provavelmente por causa da boa transferência de calor e baixo peso específico do hidrogênio.
- Gases monoatômicos, tais como o argônio, possuem fraca transferência de calor quando comparados aos gases diatômicos.

- O corte de aços baixo carbono é complicado, por causa da grande variação na velocidade e qualidade do corte, que pode ocorrer em lotes diferentes de aços nominalmente idênticos. Observou-se que o corte da chapa de aço AISI 1020 que usou o nitrogênio como gás de plasma e proteção, para um determinado lote deste material foi realizado com facilidade, enquanto que para um outro lote deste mesmo material, o corte foi insatisfatório. Mudando o gás de proteção para o oxigênio, observou-se uma redução nesta diferença. Este melhoramento foi observado em menor grau quando o ar comprimido foi usado como gás de proteção.

- Por razões que ainda são desconhecidas, a presença do oxigênio no arco de plasma reduz os problemas com qualidade que são encontrados no corte por plasma de aços baixo carbono.

- A seleção dos gases afetam não somente a velocidade e qualidade do corte, mas igualmente afetam o design da pistola, a vida do eletrodo e a vida do bico de corte.

3.4. QUALIDADE x FATORES NO CORTE POR PLASMA:

Conforme apresentado no capítulo 1, ***figura 1.1***, as respostas ou características de interesse de um determinado processo podem ser afetadas pelos fatores ou variáveis de entrada que compõem este processo. O Processo de Corte por Plasma analisado sob este aspecto, apresenta alguns fatores que influem em determinadas características de interesse deste processo. Assim, pode-se citar como fatores influentes no Processo de Corte por Plasma:

- tipo de sistema escolhido;
- design da pistola;
- gás de plasma, gás de proteção e diâmetro do furo do bico de corte;
- distância pistola/peça (*standoff*);
- velocidade de corte;
- corrente e energia do arco;
- pressão dos gases;
- material e espessura da chapa a ser cortada.

A espessura do material a ser cortado afeta diretamente a velocidade de corte. A velocidade de corte também é influenciada pelo tipo de material que se pretende cortar. Por

exemplo, a velocidade de corte do alumínio é aproximadamente 25% superior a do aço em uma mesma situação de corte (**Landry, 1984 apud Benedict, 1987**).

As tolerâncias que podem ser obtidas com o Processo de Corte por Plasma são de aproximadamente ± 0,8 mm em espessuras menores que 25 mm e ± 3 mm em espessuras maiores que 25 mm. A forma cônica obtida na superficie de corte varia de acordo com os parâmetros do processo mas é de geralmente 5 à 7 graus quando o gás de plasma não é forçado a entrar em movimento espiral na pistola. As larguras das frestas de corte são de 1,5 a 2 vezes a largura obtida com o processo Oxi-corte em chapas de até 50 mm de espessura (**Benedict,1987**).

Uma variável importante no processo é a direção de deslocamento da pistola. A maioria das pistolas de corte impõe um movimento espiral ao gás de plasma. Isto provoca uma transferência mais efetiva do arco a um dos lados da superficie de corte. Com o espiral no sentido horário por exemplo, o lado direito do corte (na direção do deslocamento) terá uma superficie com menor inclinação que o lado esquerdo que ficará chanfrado. Desta forma, a direção do deslocamento deverá deixar a sobra (refugo) de material para o lado esquerdo, conforme mostrado na ***figura 3.4*** . Pistolas com o espiral no sentido anti-horário podem ser usadas caso se deseje que a superficie com menor inclinação fique do lado esquerdo (na direção do deslocamento) da peça.

A variável distância pistola/peça também é de grande importância para o processo e portanto deve ser mantida constante durante todo o processo de corte. Segundo **Weller** e **Haavisto (1984),** existem equipamentos munidos de um sistema de controle para manter a distância constante através da monitoração do arco voltaico, o qual emite um sinal para operar um motor que controla o afastamento ou aproximação da pistola á peça.

Geralmente cortes de baixas velocidades com potências moderadas apresentam boa qualidade. Entretanto, baixas velocidades prejudicam o lado econômico da aplicação do processo de corte por plasma.

Alguns trabalhos são encontrados na literatura, onde se procura avaliar os efeitos em determinadas características de interesse, ocasionados pela alteração em alguns dos fatores de um dado processo de corte por plasma. Neste sentido, dois trabalhos podem ser citados.

O primeiro de **Severance** e **Anderson (1984)**, procura analisar os efeitos ocasionados ao se usar uma mistura de gases (para o gás de plasma e gás de proteção) e diferentes designs de pistolas para o corte de chapas de aço inoxidável, alumínio e aço baixo carbono, tendo como características de interesse a velocidade de corte e a qualidade do corte.

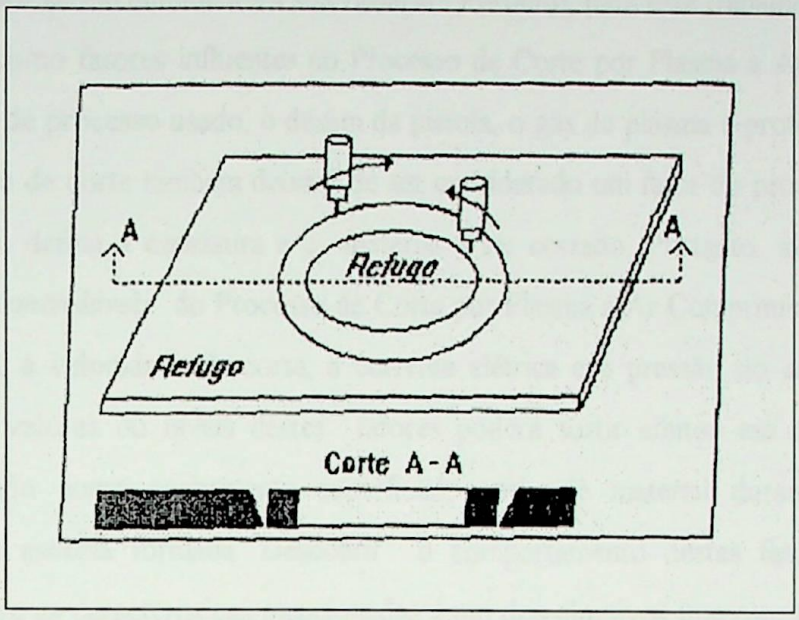


Figura 3.4: Influência do sentido de deslocamento da pistola.
Fonte: Weller e Haavisto, 1984.

O segundo, de **Harris** e **Lucas (1987)**, procura analisar os efeitos ocasionados ao se introduzir a água (através de um vaso de pressão umidificador) em diferentes composições de gases para o corte do aço carbono-manganês, aço inoxidável e alumínio, tendo como características de interesse a rugosidade da superfície de corte, a largura da fenda de corte (*kerf*), a quantidade de escória produzida e os efeitos metalurgicos na superfície de corte. A qualidade de corte dos materiais citados foi medida variando-se além da umidade dos gases, a velocidade de corte, a corrente, a taxa do fluxo de gás (pressão) e a distância entre o bico de corte e a peça, que são exatamente os fatores que esta dissertação irá analisar para o Processo de Corte por Plasma a Ar Comprimido.

Porém, observou-se que nenhum destes dois trabalhos fizeram uso da metodologia Projeto e Análise de Experimentos. O trabalho de **Harris** e **Lucas (1987)** cita ainda que após testes preliminares, obteve-se o ponto ótimo para os fatores: taxa do fluxo de gás e distância entre o bico de corte/peça, mantendo-se estes fatores constantes durante a investigação. Este procedimento pode ser considerado correto se os fatores forem independentes entre si, ou seja, eles não interagem entre si, ou ainda, a mudança no nível de um fator não altera o comportamento dos demais fatores.

No início deste item foram identificados alguns fatores que interferem no Processo de Corte por Plasma. Escolhido o processo, por exemplo, o Processo de Corte por Plasma a Ar

Comprimido que é objeto de estudo deste trabalho, alguns destes fatores deixaram de ser considerados por serem eliminados a sua variação. Portanto, para este trabalho deixaram de ser considerados como fatores influentes no Processo de Corte por Plasma a Ar Comprimido os fatores: o tipo de processo usado, o design da pistola, o gás de plasma e proteção. O diâmetro do furo do bico de corte também deixará de ser considerado um fator do processo a partir do instante que se defina a espessura e o material a ser cortado. Portanto, ainda permanecem como fatores *controláveis* do Processo de Corte por Plasma a Ar Comprimido, a distância da pistola a peça, a velocidade de corte, a corrente elétrica e a pressão do ar comprimido. A alteração nos valores ou níveis destes fatores poderá surtir efeitos em características do material cortado como acabamento superficial, perda de material durante o corte e a quantidade de escória formada. Descobrir o comportamento destes fatores e de suas interações sobre as características mencionadas é um dos objetivos que este trabalho pretende atingir .

CAPÍTULO 4
ESTUDO DE CASO

4.1. INTRODUÇÃO:

No capítulo anterior observou-se que alguns fatores (variáveis) do Processo de Corte por Plasma a Ar Comprimido interferem na qualidade do corte deste processo. Sendo estes fatores passíveis de controle, a aplicação da técnica Projeto e Análise de Experimentos pode auxiliar na obtenção de um corte com melhor qualidade.

O estudo do comportamento dos fatores deste processo foi realizado no Laboratório de Soldagem da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, com o apoio dos laboratórios de Metrologia Dimensional e Metalografia. Para a medição de uma das resposta também foi necessário recorrer ao Laboratório de Metrologia de uma empresa instalada em Itajubá.

Dentre todos os fatores citados no *item 3.4* , este trabalho analisou os seguintes:

- ***pressão do gás de plasma;***
- ***velocidade da pistola de corte;***
- ***corrente;***
- ***distância entre a pistola de corte a peça.***

Segundo **Schneider** e **Flesch (1982)**, "Apesar dos experimentos diferirem em seus objetivos e montagem física, existem certas ações e regras aplicáveis, praticamente, a qualquer experimento. Um experimento consta das seguinte etapas:

- planejamento;
- preparação;
- execução;
- processamento, análise e documentação."

4.2. PLANEJAMENTO:

A formulação do problema é o ponto de partida para o planejamento da experimentação. Dessa forma, o problema pode ser formulado como a busca da melhoria da qualidade do Corte por Plasma a Ar Comprimido através da análise do comportamento e influência dos fatores: pressão do gás de plasma, velocidade da pistola de corte, intensidade da corrente e distância da pistola de corte à peça.

Diante deste cenário, algumas definições se fizeram necessárias. A primeira dizia respeito a escolha das variáveis de resposta do processo analisado. A preocupação com a qualidade do corte é o ponto de partida. Outros aspectos como alterações metalúrgicas não foram analisadas neste trabalho.

Para **Campos (1992)**, qualidade é vista sob cinco dimensões, descritas a seguir:

- qualidade (medida de característica);
- custo;
- entrega;
- moral;
- segurança.

A qualidade do corte foi definida sobre duas destas dimensões: qualidade e custo. Estas duas dimensões permitem que a qualidade do corte ou corte ótimo seja analisada sob três aspectos:

- ***acabamento superficial medido através da ondulação da superfície cortada ;***
- ***perda de material medida através da diferença entre a massa do corpo de prova antes do corte e após o corte;***
- ***formação de escória medida através da massa de escória gerada pelo corte.***

Assim, ondulação, perda de material e formação de escória foram definidas como variáveis de resposta do processo analisado. Desse modo, a menor ondulação, a menor perda de material e a menor formação de escória apontam para um corte de melhor qualidade ou corte ótimo.

Outra definição que se fez necessária diz respeito as dimensões do corpo de prova. Por não se ter encontrado norma, procedimento ou recomendação, tomou-se corpos de prova com 5 cm de largura por 10 cm de comprimento. Estabelecida estas dimensões, restou escolher a espessura. A espessura foi escolhida em função do diâmetro do bico de corte. O diâmetro do bico de corte usado foi de 1,32 mm. Este diâmetro permite que sejam cortadas chapas que variem sua espessura de 6 mm a 19 mm, aproximadamente, de acordo com tabela fornecida pelo fabricante da maquina de corte **(anexo 2)**. A espessura escolhida foi de 15,9 mm de um aço carbono SAE 1020, por ser este o material disponível em quantidade suficiente para a execução da experimentação. O corpo de prova foi cortado ao longo do comprimento em partes aproximadamente simétricas.

O projeto de experimento a ser usado precisou também ser definido. Adotou-se um Planejamento Fatorial Fracionado do tipo 2^{4-1} que permitiu uma redução de 16 para 8 tratamentos experimentais diferentes. Com o objetivo de determinar a significância estatística dos resultados observados, foi previsto a replicagem da experimentação por mais duas vezes, resultando deste modo um total de 24 tratamentos a serem realizados. Como não se conhecia a influência do desgaste do diâmetro do bico de corte, o conceito de blocagem foi empregado. Dessa forma cada repetição foi tratada como um bloco, resultando portanto três blocos.

Adotado o projeto do experimento, precisou-se estabelecer os níveis nos quais os fatores foram ensaiados. Estes níveis foram determinados em função de indicações do fabricante do equipamento de corte **(anexo 2)**, de resultados obtidos por **Roca (1996)** e de alguns testes preliminares executados. Partindo destas informações foram estabelecidos os níveis superior e inferior para os fatores, de acordo com a ***tabela 4.1***.

Tabela 4.1: Fatores e seus respectivos níveis.

Fator	Nível inferior (-)	Nível superior (+)
Pressão	5,3 Kgf/cm^2	7,1 Kgf/cm^2
Velocidade	12,4 cm/min	23,7 cm/min
Corrente	62,5 A	70,0 A
Distância	3,04 mm	4,38 mm

No planejamento também foram previstos os equipamentos e instrumentos de medição necessários a realização da experimentação.

4.2.1. Equipamentos:

PLASMARC C-70 - Máquina de corte por plasma a ar comprimido. Faixa de variação da velocidade: 0 a 600 cm/min. Faixa de espessura de corte: 0 a 19 mm;

Maquina de Corte MC-46 (Carro elétrico) - Faixa de variação de velocidade: 10 a 100 cm/min;

Compressor - Fornecimento de ar comprimido;

4.2.2. Instrumentos:

Balanças - Para pesar os corpos de prova e a escória;

Cronômetro - Para aferir a velocidade real do carro elétrico;

Para finalizar, também foi prevista uma tabela para a coleta dos dados.

4.3. PREPARAÇÃO:

Após o planejamento global elaborado, é comum que alguns preparativos e dispositivos sejam elaborados antes de se iniciar a execução de uma experimentação. A ***figura 4.1*** é apresentada com o objetivo de facilitar a compreensão dos preparativos e dispositivos elaborados. A bancada de ensaio foi composta dos seguintes equipamentos e dispositivos que podem ser identificados na ***figura 4.1***

Observa-se através da ***figura 4.1*** que o bico de corte foi acoplado a um carro elétrico que possuía controle de velocidade e corria em uma guia. A mesa de corte foi um dispositivo criado para facilitar o corte dos corpos de prova. A distância entre o bico de corte e o corpo de prova foi controlada através da utilização de dois calços de 10 por 5 cm e espessuras de 3,04 mm e 4,38mm. O dispositivo que fez o acoplamento entre o bico de corte e o carro elétrico permitia este ajuste. A distância entre a mesa de corte e a guia pode ser considerada constante, no trecho utilizado.

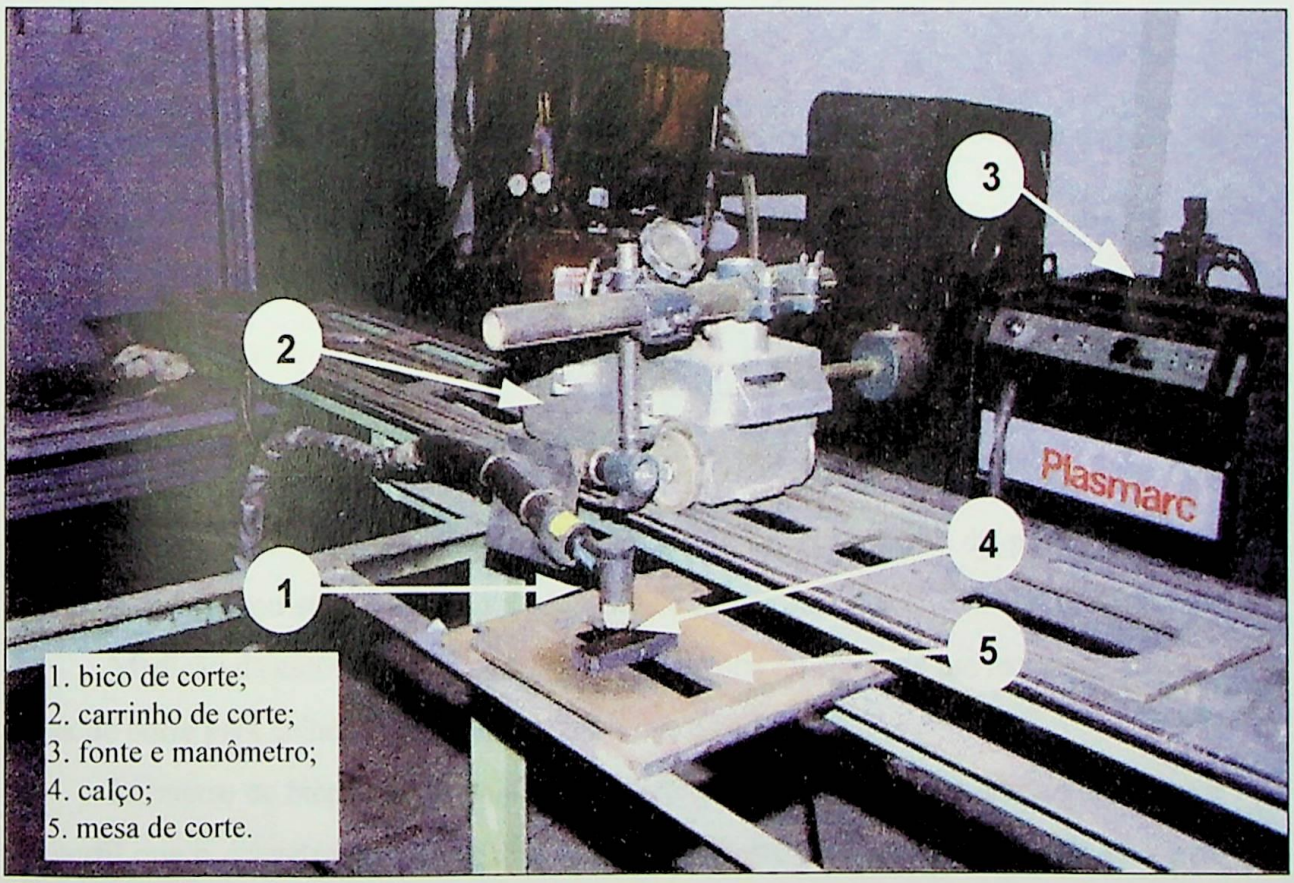


Figura 4.1: Bancada de ensaios.

Verificou-se também o alinhamento da guia onde corria o carro elétrico. Encontrou-se o trecho de menor variação e teve-se o cuidado de executar todos os corte nesta mesma posição. O valor da corrente foi controlado através da fonte e o valor da pressão foi controlado através do manômetro do próprio equipamento de corte.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

Outros preparativos se fizeram necessários. Foram cortadas tiras de 1 m de comprimento por 10 cm de largura de uma mesma chapa de 15,9 mm de espessura no Oxi-corte. Estas tiras foram levadas para a serra onde foram cortadas em pedaços de 5 cm formando-se assim o corpo de prova anteriormente especificado.

Estes corpos de prova foram rebarbados no esmeril e identificados através de números nos cantos superior direito e esquerdo, conforme ilustra a ***figura 4.2***. Cada número possuía um significado. O primeiro representava a replicagem (ou bloco) e o segundo representava a ordem seqüencial de realização dos testes, na referida replicagem.

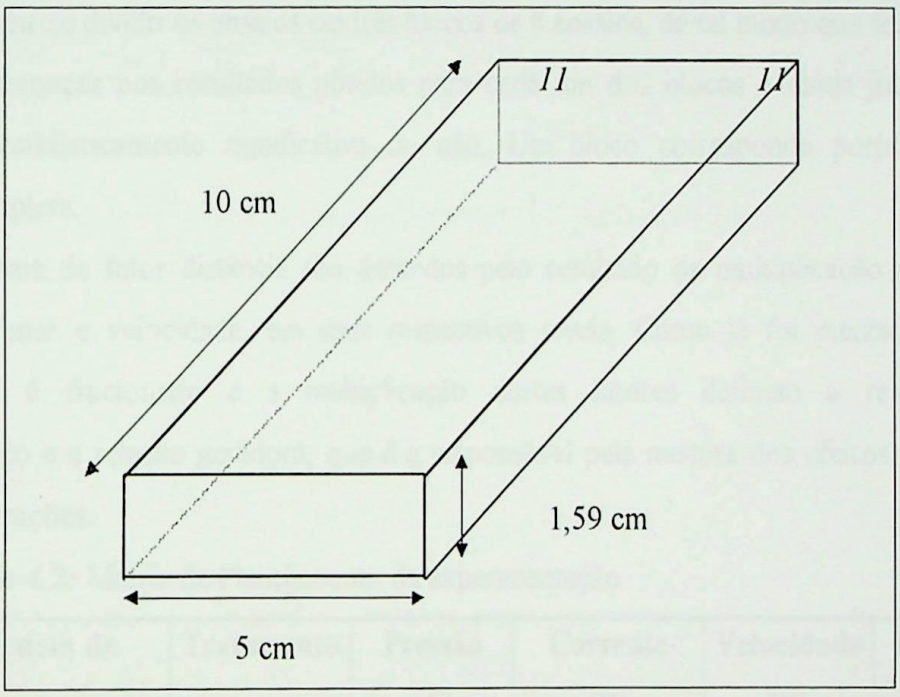


Figura 4.2: Corpo de prova.

Medição da massa (m_i): mediu-se a massa inicial dos corpos de prova na balança mecânica e registrou-se estes dados na ***tabela 4.3*** de coletas de dados.

Medição da escória (m_e): para a medição da escória foi colocado um recipiente abaixo da mesa de corte para colher a escória formada durante o corte.

Diâmetro do bico de corte: utilizou-se um bico novo e verificou-se através do projetor de perfil que o diâmetro do bico de corte era perfeitamente circular e seu diâmetro estava de acordo com o especificado (1,32 mm). Ao final dos testes, foi verificado novamente o diâmetro do bico de corte com o objetivo de avaliar a influência do desgaste por ele apresentado.

Aferição das balanças digital e mecânica. Observou-se uma diferença de leitura de aproximadamente 1 (um) grama.

4.4. EXECUÇÃO:

A ***Tabela 4.2*** representa a matriz de planejamento da experimentação gerada pelo *software Statgraphics (versão 5.0 de propriedade da PLUS WARE PRODUCT)*. A coluna execução que é subdividida em três colunas (primeira experimentação, primeira repetição e segunda repetição) indica a ordem de execução dos tratamentos. A coluna tratamento refere-se a cada uma das 8 diferentes condições experimentais geradas pela Matriz de Planejamento. O sinal (+) significa que o fator se encontra no nível superior e o sinal (-) que se encontra no nível inferior ***(tabela 4.1)***. Como a condição inicial do primeiro ensaio não é igual a condição do último, resolveu-se dividir os ensaios em três blocos de 8 ensaios, de tal modo que fosse possível identificar diferenças nos resultados obtidos para cada um dos blocos e ainda julgar se esta diferença é estatisticamente significativa ou não. Um bloco corresponde portanto a uma repetição completa.

Os sinais do fator distância são definidos pelo resultado da multiplicação dos fatores pressão, corrente e velocidade, em seus respectivos níveis. Como já foi mencionado, este planejamento é fracionado e a multiplicação destes fatores definem a resolução da experimentação e a relação geradora, que é a responsável pela mistura dos efeitos dos fatores com suas interações.

Tabela 4.2: Matriz de Planejamento da experimentação.

Ordem de execução			**Tratamento**	**Pressão (A)**	**Corrente (B)**	**Velocidade (C)**	**Distância (D)**
5	6	2	1	-	-	-	-
1	8	8	2	+	-	-	+
7	1	7	3	-	+	-	+
2	4	1	4	+	+	-	-
3	3	5	5	-	-	+	+
8	2	4	6	+	-	+	-
4	7	6	7	-	+	+	-
6	5	3	8	+	+	+	+

4.4.1. Coleta dos Dados:

Após a execução de cada tratamento, a escória que permanecia aderida ao corpo de prova foi cuidadosamente removida dentro do recipiente que já continha a escória produzida

durante o corte deste tratamento. Toda a escória do recipiente foi então pesada na balança digital. A quantificação da escória formada foi obtida pela quantidade de escória produzida em um tratamento dividido pela massa inicial do corpo de prova deste tratamento. Este resultado foi multiplicado por 100 para se obter o resultado em porcentagem. Isto é mais fácil ser percebido pela ***equação 4.1***:

$$m_e = \left(\frac{m_{ef}}{m_i} \right) * 100$$

(4.1)

onde:

m_{ef} : massa de escória formada

Os resultados obtidos encontram-se na ***tabela 4.3***.

A seguir foi pesada a massa final do corpo de prova na balança mecânica. Para medir a perda de massa dividiu-se a diferença entre a massa inicial e final pela massa inicial. Da mesma forma que a anterior, multiplicou-se este resultado por 100. Isto também é mais fácil de ser percebido pela ***equação 4.2***:

$$m_p = \left(\frac{m_i - m_f}{m_i} \right) * 100$$

(4.2)

onde:

m_p : perda de massa;

m_f : massa final.

Os resultados obtidos encontram-se na ***tabela 4.3***.

A medida do acabamento superficial foi feita através do conceito de ondulação pois, após algumas tentativas, verificou-se por meio do rugosimetro do Laboratório de Metrologia da EFEI que a rugosidade não era a medida que melhor caracterizava a superfície cortada. A superfície foi melhor caracterizada pela sua ondulação. Depois de buscar alternativas que pudessem quantificar o acabamento superficial, utilizou-se um perfilômetro de uma empresa instalada em Itajubá, capaz de registrar a ondulação da superfície. Entretanto a única informação deste equipamento foi o registro em forma de gráfico da ondulação de uma superfície. Registrou-se então, em uma mesma posição, para todos os corpos de prova, a ondulação em forma gráfica onde amplitude da onda foi aumentada 200 vezes e o comprimento foi ampliado 10 vezes. Estes registros encontram-se no **anexo 3**.

Segundo tabela da norma **DIN 4768 (Apud, Arand, 1989)**, o comprimento necessário para a medição do acabamento superficial destes corpos de prova é de 12,5 mm. O registro de todas as superficies foram feitas com pouco mais de 15 mm. A forma encontrada para medir o acabamento foi fazer a leitura de 150 pontos (que correspondem a 15 mm) de cada um dos 24 gráficos gerado. Cada grupo de 150 pontos foi então levado ao *software Statgraphics* com o objetivo de reproduzir a ondulação da superficie. Como a superficie cortada normalmente apresentava uma determinada inclinação (que pode ser observada nos gráficos do **anexo 3**), em função do corte ou da posição do corpo de prova no momento do registro gráfico, foi necessário corrigir estes gráficos. Em uma tela de trabalho deste mesmo *software* foi possível corrigir cada um dos 150 conjuntos de pontos, eliminando esta tendência de inclinação. Feito esta correção, o *software* encontrou um valor médio para cada um dos gráficos gerados. Cada corpo de prova possui o seu registro em uma folha onde consta a identificação do corpo de prova, os níveis dos fatores, a média de todos os 150 (corrigidos) e a variância destes pontos em relação a seu valor médio. A variância de cada um dos 150 pontos (corrigidos) de um gráfico em relação a sua linha média foi a maneira encontrada para medir o acabamento superficial dos corpos de prova. Pode-se observar que os valores médios de cada um dos 150 conjuntos de pontos são valores muito próximo de zero. É possível então, imaginar uma linha reta passando por este ponto médio. Esta reta corresponderia a uma superficie de corte ideal (***figura 4.3***).

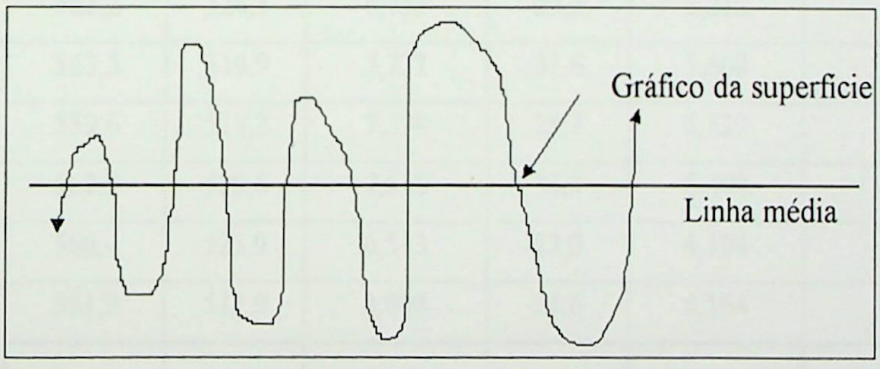


Figura 4.3: Representação esquemática do modo como foi medido o acabamento superficial.

Os resultados obtidos encontram-se registrados na ***tabela 4.3*** (página 58).

Vale lembrar que somente um lado da superficie cortada foi medido, visto, que o outro lado, como já mencionado no capítulo anterior, em termos de corte, é considerado refugo. A ***tabela 4.3*** apresenta todos estes resultados, sendo importante destacar que, *CP* significa corpo de prova, o primeiro digito representa a ordem de execução do ensaio e o segundo refere-se ao bloco.

4.5. CÁLCULOS E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS:

Através dos resultados obtidos e descritos na *tabela 4.3*, calculou-se a média (confundida) dos resultados, os efeitos dos blocos e os efeitos dos contrastes. Todos os cálculos

Tabela 4.3: Coleta dos resultados.

Corpo de prova	Massa inicial	Massa final	Perda de massa	Massa de carepa	Escória formada	Acabamento superficial
	gramas	gramas	%	gramas	%	admensional
CP11	561,2	516,4	7,983	32,7	5,827	12,84
CP21	565,9	522,6	7,652	29,1	5,142	15,21
CP31	562,4	525,6	6,543	25,8	4,587	9,26
CP41	570,0	533,5	6,404	24,2	4,246	7,35
CP51	562,4	517,8	7,930	33,6	5,895	8,49
CP61	564,1	522,0	7,463	29,7	5,265	2,55
CP71	566,8	512,5	9,580	43,0	7,586	116,29
CP81	560,0	532,8	4,857	22,5	4,018	28,04
CP12	559,1	504,5	9,766	41,4	7,405	114,64
CP22	560,0	532,5	4,911	23,3	4,161	9,57
CP32	562,2	524,4	6,759	29,3	5,212	8,28
CP42	563,5	519,9	7,737	31,6	5,608	14,44
CP52	559,6	518,2	7,398	28,7	5,129	5,95
CP62	562,9	520,6	7,515	30,4	5,400	35,05
CP72	560,4	523,9	6,513	23,0	4,104	12,25
CP82	561,3	515,9	8,088	34,6	6,164	5,02
CP13	558,4	517,1	7,396	30,2	5,408	10,53
CP23	558,8	518,2	7,248	31,5	5,637	13,59
CP33	560,7	520,8	7,116	28,7	5,119	23,68
CP43	558,1	527,4	5,501	26,5	4,748	30,74
CP53	562,9	527,1	6,360	28,4	5,045	38,95
CP63	567,9	532,4	6,251	23,8	4,191	6,75
CP73	562,3	510,8	9,159	43,3	7,701	10,05
CP83	560,9	516,6	7,898	36,2	6,454	8,22

foram feitos com o auxílio do *software Statgraphics* e são apresentados nas tabelas a seguir. Análises foram feitas com o auxílio do gráfico normal e gráfico dos efeitos. Complementando estas análises, foram estabelecidos intervalos de confiança para as respostas. Vale lembrar que todas as análises que se seguem, foram feitas considerando a região de contorno definida pelos níveis dos fatores.

4.5.1. Resultados Para a Perda de Massa:

O valores encontrados através do *Software Statgraphics*, dos efeitos estimados para a perda de massa estão resumidos na ***tabela 4.4***:

Tabela 4.4: Efeitos estimados para a perda de massa e seus respectivos erros padrão com 14 graus de liberdade.

Média + ABCD	7,25117 +/- 0,04644
(A) Pressão + BCD	-0,50233 +/- 0,09289
(B) Corrente +ACD	0.9035 +/- 0,09289
(C) Velocidade +ABD	-1,823 +/- 0,09289
(D) Distância + ABC	1,18317 +/- 0,09289
AB +CD	0,01716 +/- 0,09289
AC + BD	0,23833 +/- 0,09289
AD + BC	0,13216 +/- 0,09289
Bloco	0,16941 +/- 0,13137
Bloco	-0,27008 +/- 0,13137

4.5.1.1. Interpretação dos Resultados da Perda de Massa Através do Gráfico Normal:

A ***figura 4.4*** mostra o resultado da perda de massa através do gráfico normal. Através deste gráfico, é possível se ter uma primeira avaliação dos resultados. Os pontos que se encontram afastados da região central (zero da abcissa) e distantes da reta obtida neste gráfico, indicam a existência de contrastes significativos. Quanto mais afastado e distante estiver um ponto , mais significativo deve ser o contraste a ele associado.

Da ***figura 4.4*** pode-se observar que 4 pontos se encontram afastados do zero e distantes da reta. Isto significa que de todos os contrastes calculados, quatro aparentam ser significativos. Espera-se que esta observação seja confirmada pela análise que se segue.

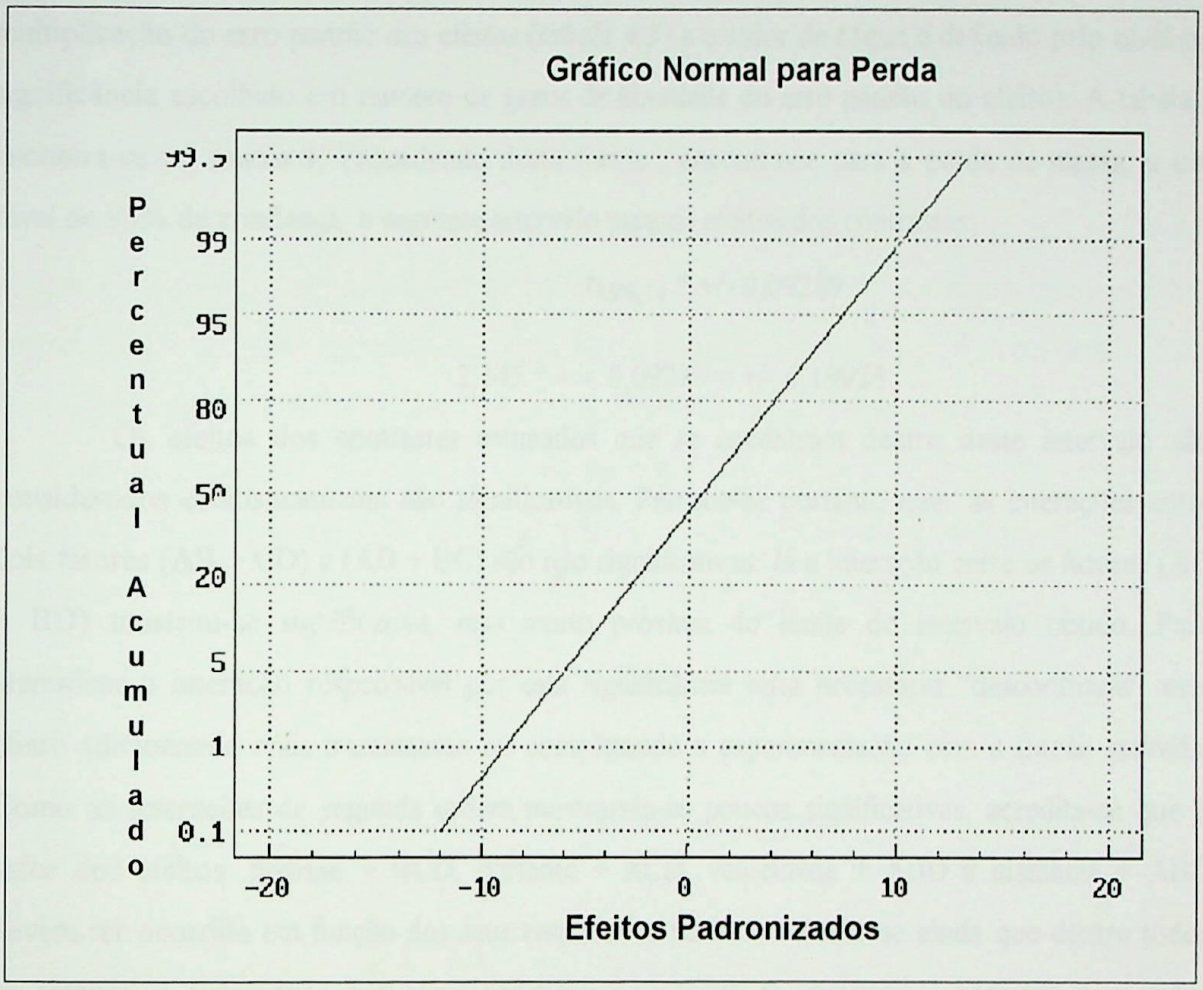


Figura 4.4: Gráfico normal para a perda gerado pelo *Statgraphics*.

4.5.1.2 Intervalo de Confiança:

Observa-se na ***tabela 4.4*** que por se tratar de um Planejamento Fatorial Fracionado, os efeitos principais e as interações de segunda, terceira e quarta ordem, encontram-se misturados, ou seja, confundidos. O valor obtido para a média é o resultado da soma do efeito média mais a soma do efeito da interação entre os quatro fatores. Os efeitos principal dos fatores encontram-se confundidos com interações de terceira ordem, e as interações de segunda ordem são confundidas entre si.

Os valores encontrados para os efeitos confundidos (contrastes) é uma média de três resultados. Muito provavelmente, se a experimentação toda for repetida, o valor encontrado para cada um dos tratamentos deverá ser diferente. Assim sendo, qual será o verdadeiro valor dos efeitos confundidos? Se não é possível obtê-lo, é necessário que se encontre um intervalo

onde se tenha a certeza, a um determinado nível de confiança, que o verdadeiro valor ali se encontra. A utilização da distribuição de *Student* permite determinar este intervalo e ainda afirmar se o efeito estimado é estatisticamente significativo ou não. Este intervalo é obtido pela multiplicação do erro padrão dos efeitos (***tabela 4.3***) e o valor de ***t*** (que é definido pelo nível de significância escolhido e o número de graus de liberdade do erro padrão do efeito). A tabela *t* encontra-se no **anexo 1**. Procedendo desta forma , encontra-se para a perda de massa, a um nível de 95% de confiança, o seguinte intervalo para os efeitos dos contrastes:

$$t_{95\%,14} * +/- 0,09289$$

$$2,145 * +/- 0,09289 = +/- 0,19925$$

Os efeitos dos contrastes estimados que se encontram dentro deste intervalo são considerados estatisticamente não significativos. Percebe-se portanto que as interações entre dois fatores (AB + CD) e (AD + BC) são não significativas. Já a interação entre os fatores (AC + BD) mostrou-se significativa, mas muito próxima do limite do intervalo obtido. Para identificar a interação responsável por esta significância seria necessário "desconfundir" este efeito adicionando mais tratamentos ou completando a experimentação com a fração retirada. Como as interações de segunda ordem mostraram-se poucos significativas, acredita-se que o valor dos efeitos: pressão + BCD, corrente + ACD, velocidade + ABD e distância + ABC devem ter ocorrido em função dos seus respectivos fatores. Percebe-se ainda que dentre todos os fatores, a velocidade é a mais significativa, seguida da distância , corrente e pressão, respectivamente. Esta conclusão parece ser confirmada pelas observações anteriores. Uma característica que chama a atenção é a de praticamente não existir interações significativas entre os fatores pois, somente um contraste composto de interações de segunda ordem mostrou-se pouco significativo.

O mesmo procedimento é repetido para a análise dos blocos.

$$t_{95\%,14} * +/-0,13137$$

$$2,145 * +/- 0,13137 = +/- 0,28179$$

Como nenhum dos valores estimados para o efeito dos blocos se encontravam fora do intervalo acima, concluiu-se não ter havido para a perda de massa diferença significativa entre as perdas observadas em cada um dos blocos.

4.5.1.3. Gráfico dos Efeitos Principais dos Fatores Para a Perda de Massa:

A ***figura 4.5*** representa os efeitos principais dos fatores para a perda de massa. Este gráfico possibilita entender o comportamento dos fatores na resposta analisada. Observa-se através da ***figura 4.5*** que o aumento nos níveis dos fatores velocidade e pressão tem como conseqüência uma redução da perda de massa, sendo esta redução mais significativa para o fator velocidade. Na ***tabela 4.4*** (página 57), o fator velocidade apresenta-se como o mais significativo de todos, devendo portanto ser o ponto mais afastado do zero e mais distante da reta. O inverso ocorre para os fatores corrente e distância, ou seja, o aumento nos níveis destes fatores acarretam um aumento na perda de massa, sendo este aumento mais significativo para o fator distância. É interessante notar que, no caso do fator distância, o aumento gradativo de seu nível além do limite superior estabelecido, deverá ter como conseqüência uma redução da perda de massa, contrariando a conclusão anterior. Entretanto, as conclusões somente são válidas para a região de contorno definida pelos limites superior e inferior dos fatores.

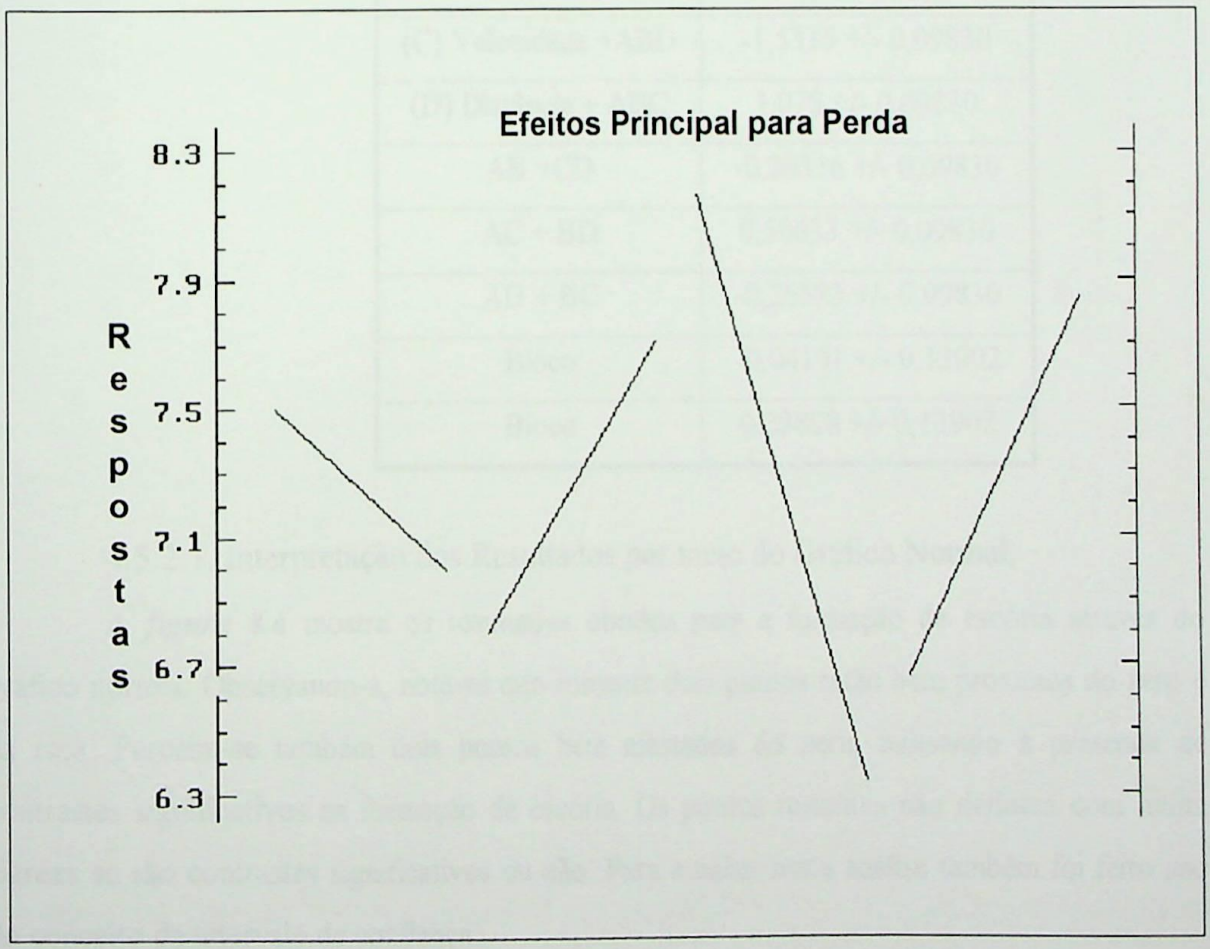


Figura 4.5: Gráfico dos efeitos principais para a perda de massa gerado pelo *Statgraphics*.

Se o objetivo fosse otimizar a perda de massa, minimizando-a, um novo experimento em torno do nível superior para a velocidade e pressão e, em torno do nível inferior para corrente e distância, deveria ser o próximo passo a ser dado para atingir este objetivo.

4.5.2. Resultados Para a Formação de Escória:

Os valores dos efeitos estimados para a formação de escória estão resumidos na ***tabela 4.5*** .

Tabela 4.5: Efeitos estimados para a formação de escória e seu respectivos erros padrão com 14 graus de liberdade.

Média + ABCD	5,41883 +/- 0,04915
(A) Pressão + BCD	-0,3305 +/- 0,09830
(B) Corrente +ACD	0,313 +/- 0,09830
(C) Velocidade +ABD	-1,5335 +/- 0,09830
(D) Distância + ABC	1,078 +/- 0,09830
AB +CD	-0,26316 +/- 0,09830
AC + BD	0,50633 +/- 0,09830
AD + BC	-0,26583 +/- 0,09830
Bloco	-0,04191 +/- 0,13902
Bloco	0,23808 +/- 0,13902

4.5.2.1. Interpretação dos Resultados por meio do Gráfico Normal:

A ***figura 4.6*** mostra os resultados obtidos para a formação de escória através do gráfico normal. Observando-a, nota-se que somente dois pontos estão bem próximos do zero e da reta. Percebe-se também dois pontos bem afastados do zero, indicando à presença de contrastes significativos na formação de escória. Os pontos restantes não definem com muita clareza se são contrastes significativos ou não. Para auxiliar nesta análise também foi feito uso do conceito de intervalo de confiança.

4.5.2.2. Intervalo de Confiança:

Todas as considerações para a perda de massa foram também aqui aplicadas.

Da mesma forma, encontrou-se o intervalo de confiança para a formação de escória que definiu se as estimativas dos contrastes são significativas ou não.

$$t_{95\%,14} * +/- 0,09830$$

$$2,145 * +/- 0,09830 = +/- 0,21085$$

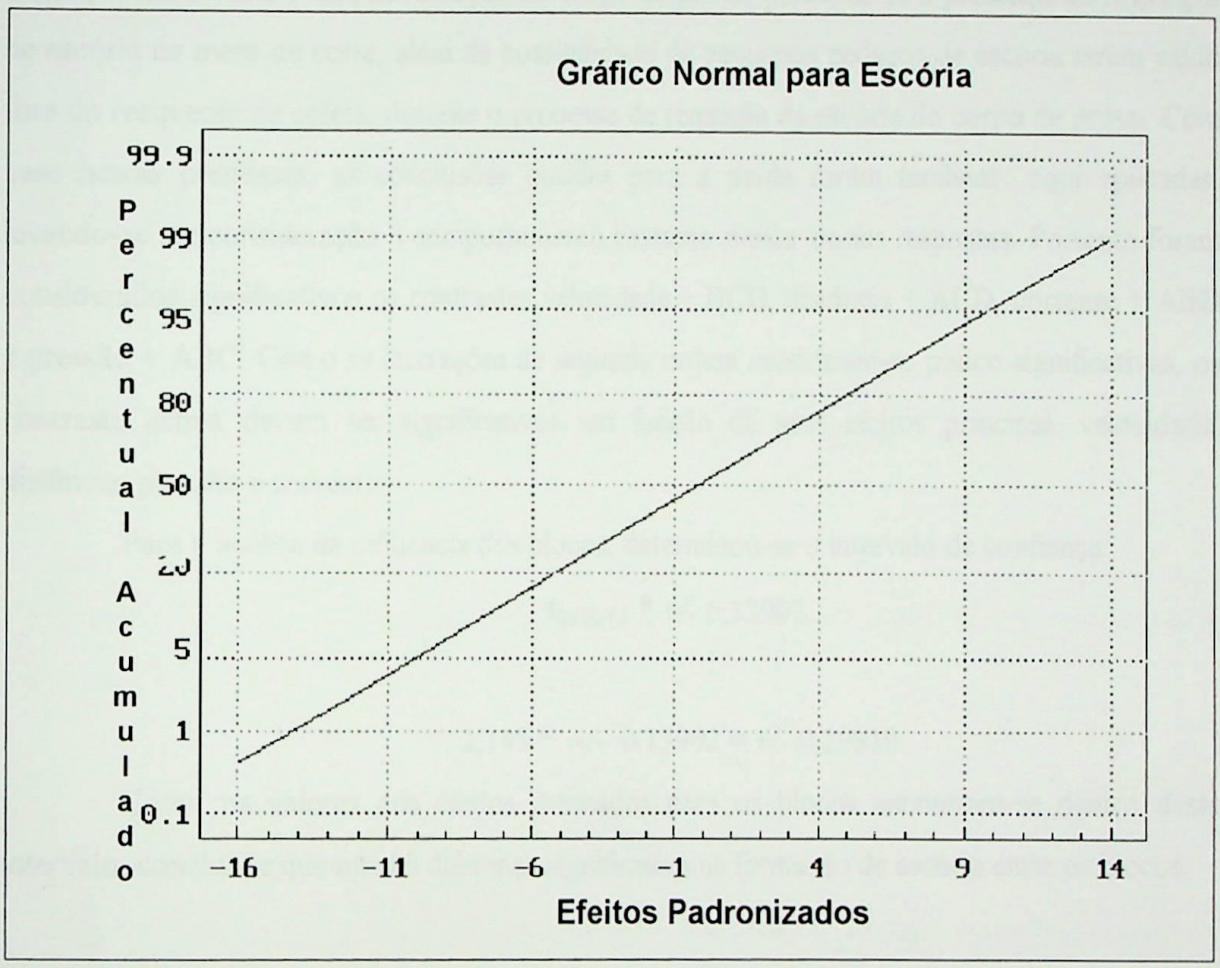


Figura 4.6: Gráfico normal para a formação de escória gerado pelo *Statgraphics*.

Observando-se os resultados da ***tabela 4.5*** conclui-se que todos contraste são significativos, com um maior ou menor grau de significância, a menos dos blocos que foram analisados à parte. Assim sendo, torna-se difícil determinar qual a parcela do contraste (efeito confundido) é a responsável por esta significância. Por exemplo, fica difícil determinar qual a parcela do resultado estimado para o contraste AB + CD é devida a AB e a CD. Neste caso, recomenda-se executar a fração da experimentação não executada ou ainda alguns tratamentos desta fração, desde que se consiga um melhor compreensão da participação dos efeitos na composição dos contraste. Entretanto, observa-se que o contraste que tem a participação do fator velocidade é aqui também o mais significativo. O contraste que tem a participação do fator

distância é aqui também o segundo mais significativo. Nota-se uma inversão para os contraste formados pelos fatores corrente e pressão, sendo este último mais significativo. Todavia, de uma maneira geral, nota-se um comportamento bastante similar ao ocorrido para a perda de massa. Isto era até previsível pois, imaginava-se existir uma relação entre estas duas respostas. Vale também salientar que, apesar de todo o cuidado tomado durante a aquisição de dados relativos a formação da escória e na sua remoção do corpo de prova, percebeu-se a presença de respingos de escória na mesa de corte, além da possibilidade de pequenos pedaços de escória terem caído fora do recipiente de coleta, durante o processo de remoção da escória do corpo de prova. Com base nestas premissas, as conclusões obtidas para a perda foram também aqui aplicadas, levando-se em consideração o comportamento bastante similar destas respostas. Portanto foram considerados significativos os contrastes velocidade + BCD, distância + ACD, corrente + ABD e pressão + ABC. Como as interações de segunda ordem mostraram-se pouco significativas, os contraste acima devem ser significativos em função de seus efeitos principal, velocidade, distância, pressão e corrente.

Para a análise da influência dos blocos, determinou-se o intervalo de confiança:

$$t_{95\%,14} * +/- 0,13902$$

$$2,145 * +/- 0,13902 = +/- 0,29819$$

Como os valores dos efeitos estimados para os blocos encontram-se dentro deste intervalo, concluí-se que não há diferença significativa na formação de escória entre os blocos.

4.5.2.3. Gráfico dos Efeitos Principais Para a Formação de Escória:

A ***figura 4.7*** representa os efeitos principais para a formação de escória. Dela nota-se que o aumento nos níveis dos fatores pressão e velocidade, traz como conseqüência uma diminuição na quantidade de escória formada, sendo esta diminuição mais significativa para o fator velocidade. O contrário foi observado para os fatores corrente e distância. O aumento nos níveis destes fatores , acarretou um aumento na formação de escória. Pensando em termos de otimização, chegou-se à uma conclusão que é idêntica à da perda de massa. Um novo experimento deveria ser feito em torno do nível superior para os fatores pressão e velocidade e, em torno do nível inferior para os fatores corrente e distância.

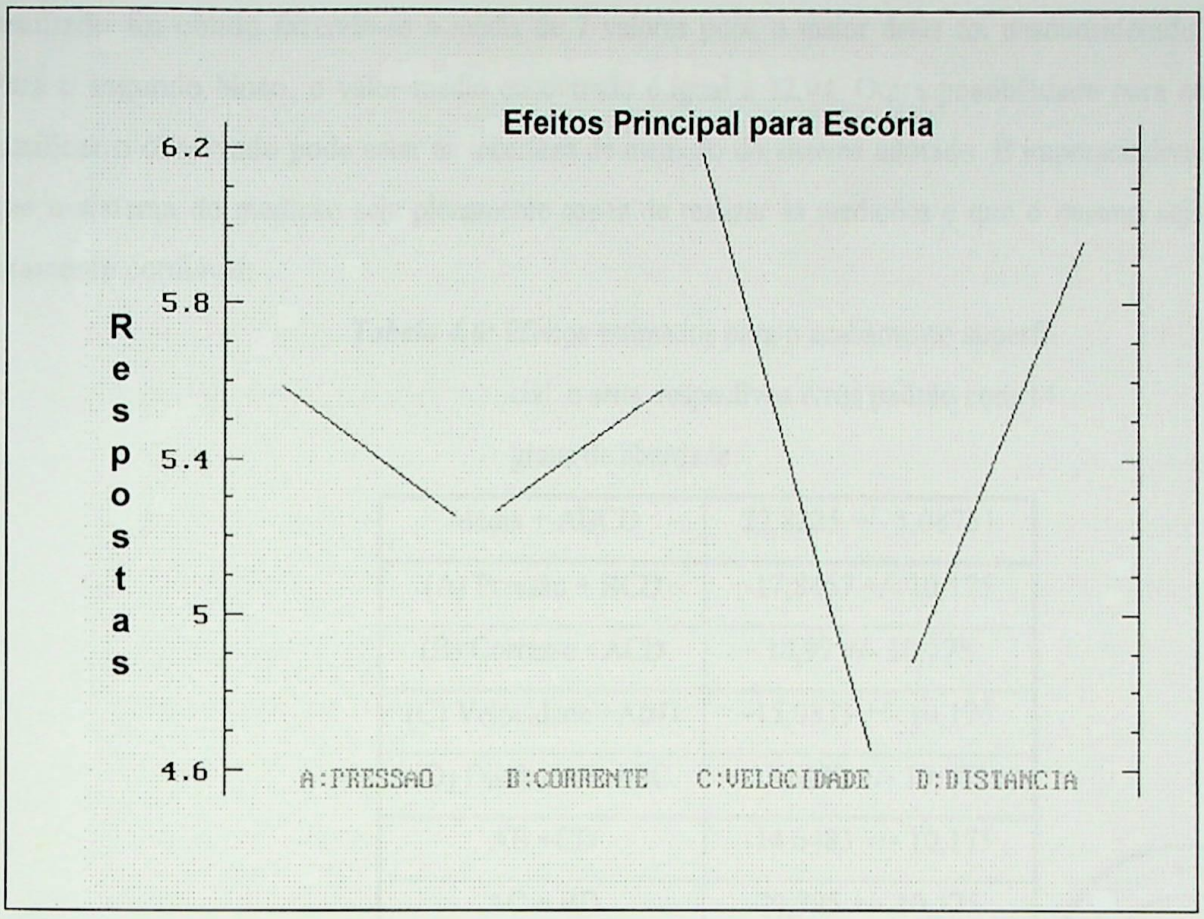


Figura 4.7: Gráfico dos efeitos principais para a formação de escória gerado pelo *Statgraphics*.

4.5.3. Resultados Para o Acabamento Superficial:

Os valores dos efeitos estimados para o acabamento superficial estão resumidos na ***tabela 4.6***.

Percebe-se na ***tabela 4.6*** que o valor do erro padrão dos efeitos estimados é muito elevado. Isto fica fácil de se perceber quando se compara o resultado de tratamentos iguais de blocos diferentes. Por exemplo, para um determinado tratamento de um bloco, obtém-se o melhor acabamento superficial para este bloco. Para o mesmo tratamento de um outro bloco tem-se o pior acabamento superficial. Esta variação muito grande, na resposta de um mesmo tratamento, fez com que a estimativa do erro fosse muito grande. Por se ter um erro muito grande, ficou difícil analisar estes dados. Desta forma, uma análise sobre um conjunto de dados que apresentou uma grande variação não seria muito confiável.

Apesar da grande dispersão de resultados observada, percebe-se também na ***tabela 4.3*** que, o valor médio do acabamento superficial do primeiro bloco de ensaio, é igual a 11,96. Este

resultado foi obtido fazendo-se a média de 7 valores pois, o maior deles foi desconsiderado. Para o segundo bloco, o valor médio encontrado é igual a 12,94. Outra possibilidade para se justificar o observado pode estar na incerteza de medição do sistema adotado. É imprescindível que o sistema de medição seja plenamente capaz de realizar as medições e que o mesmo seja altamente confiável.

Tabela 4.6: Efeitos estimados para o acabamento superficial e seus respectivos erros padrão com 14 graus de liberdade.

Média + ABCD	22,8225 +/- 5,08751
(A) Pressão + BCD	-17,8467 +/- 10,175
(B) Corrente +ACD	10,97 +/- 10,175
(C) Velocidade +ABD	-15,0833 +/- 10,175
(D) Distância + ABC	13,6433 +/- 10,175
AB +CD	-14,6483 +/- 10,175
AC + BD	20,795 +/- 10,175
AD + BC	-22,0217 +/- 10,175
Bloco	5,655 +/- 14,3896
Bloco	-10,0175 +/- 14,3896

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

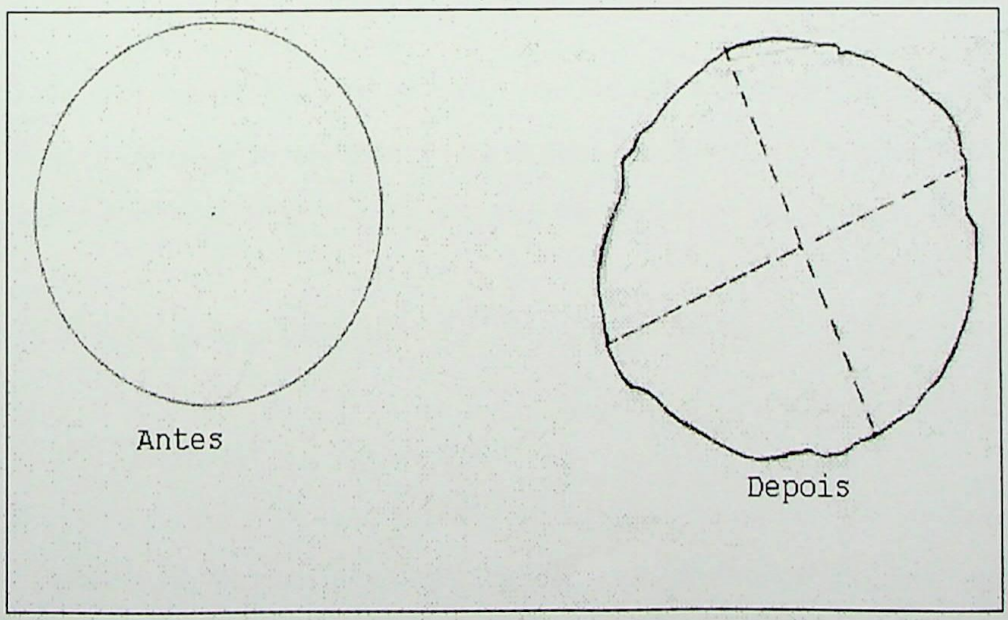


Figura 4.8: Comparação entre as condições inicial e final do bico de corte.

Também para este bloco foi desconsiderado o maior valor. Para o terceiro bloco, a média dos 8 valores é igual a 17,79. Esta observação permite concluir que a suspeita da influência do desgaste do bico de corte é bastante consistente, pelo menos para o acabamento superficial. Percebe-se que os valores de acabamento pioram do primeiro para o terceiro bloco.

A ***figura 4.8*** mostra o desgaste sofrido pelo bico de corte. É notória a diferença entre a condição inicial onde o bico era novo e a final onde ele se apresenta desgastado.

Fatores externos não controláveis definidos por Taguchi como ruídos também podem ser responsáveis ou co-responsáveis por este insucesso. Também é interessante lembrar que **Severence** e **Anderson (1984)** depararam com o mesmo tipo de dificuldade para o acabamento superficial de aços baixo carbono. Dessa forma, nada foi possível de ser concluído, a não ser o reconhecimento da influência do desgaste do bico de corte na superfície cortada.

CAPÍTULO 5
CONCLUSÕES, COMENTÁRIOS GERAIS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES:

Com base nos resultados obtidos e analisados, foi possível concluir, na região de contorno analisada, que:

- Para a perda de material e para a formação de escória, o fator velocidade foi o mais significativo na alteração do comportamento destas respostas quando o mesmo foi alterado em seus níveis adotados. O aumento no nível deste fator produziu uma redução na perda de massa e na formação de escória.

- Como segundo fator mais significativo, obteve-se para estas mesmas respostas analisadas o fator distância. O aumento no nível deste fator produziu um aumento na perda de massa e na formação de escória.

- Com um menor grau de significância para estas mesmas respostas, aparecem os fatores pressão e corrente e corrente e pressão, respectivamente. O aumento na pressão produziu menor perda de massa e menor formação de escória. O aumento na corrente produziu um aumento na perda de massa e na formação de escória.

- Para o acabamento superficial, os resultados obtidos não permitiram extrair conclusão alguma. Fatores externos não controláveis ou o desgaste do diâmetro do bico de corte podem ser os responsáveis pela grande variação observada nos resultados.

- A presença de interações significativas entre os fatores praticamente não foi observada.

5.2. CONSIDERAÇÕES GERAIS:

A aplicação da técnica Projeto e Análise de Experimentos no Processo de Corte Por Plasma a Ar Comprimido, permitiu identificar os fatores velocidade e distância como fatores de suma importância para diminuir a perda de massa e formação de escória. Especial atenção deve ser dada a estes fatores ao se estabelecer seus níveis.

Sem a utilização desta técnica, talvez fosse necessário um número muito maior de tratamentos para que se chegasse às conclusões a que se chegou, dentro de um mesmo grau de confiança. Isto demonstra o poder desta técnica e a importância de sua utilização.

Possivelmente pelos motivos anteriormente citados, não foi possível obter uma conclusão sobre o comportamento dos fatores analisados para o acabamento superficial, que era a resposta onde se depositava maior interesse, sendo também a mais trabalhosa de ser obtida. Assim, o objetivo inicialmente proposto não pode ser plenamente atingido.

5.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS:

O fato de não se atingir plenamente o objetivo inicialmente proposto deve ser encarado como um desafio para aqueles que se interessam pelo assunto abordado. Assim, recomenda-se algumas abordagens para trabalhos futuros que não foram contempladas neste trabalho ou que por ele não foram atingidas. São portanto, apresentadas as seguintes recomendações:

- Investigar os motivos pelo qual o acabamento superficial apresentou uma elevada dispersão de resultados. Possivelmente seja necessário aplicar as idéias de Taguchi, acrescentado uma matriz de fatores externos não controláveis ao planejamento do experimento.

- Trabalhar com otimização e modelagem para as resposta analisadas. Existem na literatura artigos que tratam da otimização simultânea de várias respostas.

Acrescentar outros fatores ao processo como espessuras diferentes***Figura 4.8***: Comparação entre as condições inicial e final do bico de corte.

- do corpo de prova e composição ou utilização de gases diferentes.

- Com o objetivo de analisar mudanças estruturais do material cortado, uma análise metalográfica da superfície cortada também é recomendada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAND, K W: ***A Rugosidade na Prática***. COSA do Brasil Ltda. Curitiba, 1989.

BENEDICT, G F: ***Nontradiotional Manufacturing Processes***. New York - Marcel Dekker, Inc. 1987.

BOX, G E P - HUNTER, W G - HUNTER, J S: ***Statistic for Experimenters - An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building***. New York: John Wiley & Sons, 1978.

COLEMAN, D E - MONTGOMERY, D C: ***A Systematic Approach to Planning for a Designed Industrial Experiment***. Techonometrics, **volume 35**, 1 - 27, 1993.

COSIPMAP: http://www.ims.org.cosipmap.htm, Control Systems for Industrial Plasma Manufacturing Process (COSIPMAP), 11/03/98.

GOODWIN, D: ***Air-Plasma - A Growing Force in Metal Cutting***. Welding & Metal Fabrication, 389 - 393, 1989.

GRAHAM, A: ***Thermal Cutting Processes***. Welding Review, 184 - 190, 1990.

HAARIS, I D - LUCAS, W: ***Improved Cutting Performance from the Addition of Water to the Plasma Gas in Plasma Arc Cutting***. Welding Institute Members Report, 3 - 11, 1987.

IRVING, B: ***High-Tolerance Plasma Arc Cutting Carves Out Some Niches in Industry***. Welding Journal, 33 - 37, 1992.

ISO 3534/3: ***International Organization for Standardization. Statistic - Vocabulary and Symbols - Part 3: Design of Experiments.*** 1985.

KACKER, R N: ***Off-Line Quality Control, Parameter Design, and the Taguchi Method***. Journal of Quality Technology, **volume 17**, 176 - 209, 1985.

KHATTREE, R: ***Robust Parameter Design: A Response Surface Approach***. Journal of Quality Technology, **volume 28**, 187 - 192, 1996.

LINDBERG, B: ***Cutting With Plasma***. Welding & Metal Fabrication, 166 - 190, 1990.

LUCAS, W - RENNIE, S: ***Cutting Processes - The Right Choice - Part 1***. Welding & Metal Fabrication, 122 - 127,1993.

Mc CONNEL, I A - Mc PHERSON, N A: ***The Application of Statistical Process Design to a FCAW Process***. Welding & Metal Fabrication, 122 - 127,1993.

MESSER e GRIESHEIM: ***Catálogo técnico***. Informações do fabricante.

MONTGOMERY, D C - RUNGER, G C: ***Foldovers of 2^{K-p} Resolution IV Experimental Designs***, Journal of Quality Technology, **volume 28**, 446 - 450, 1987.

MONTGOMERY, D C: ***Design and Analysis of Experiments***. New York: Georgia Institute of Technology, 1984.

NACHTSHEIM, C J: ***Tools for Computer-Aided Design of Experiments***, Journal of Quality Technology, **volume 19**, 132 - 136, 1987.

NAIR, V N: ***Taguchi's Parameter Design: A Panel Discussion***. Technometrics, **volume 34**, 127 - 161, 1992.

NETO, B B - SCARMÍNIO, I S - BRUNS, R E: ***Planejamento e Otimização de Experimentos***. Campinas: Editora da Universidade Estadual de Campinas, 1995.

POLACEK, I: ***Efficient Plate Cutting and Weld Preparation***. Welding Review International, 152 - 156, 1992.

POON, G K K: ***Optimization of Eletronic Manufacturing Process***. ASQC's 50th Annual Quality Congress, Chicago, 443 - 449, 1996.

ROCA, M A G: ***Comparação dos Processos de Corte Oxi-acetilênico e á Plasma.*** Escola Federal de Engenharia de Itajubá - Departamento de Produção; Trabalho de diploma, Novembro de 1996.

SCHNEIDER, CA - FLESCH, C A: ***Técnica de Pesquisa Experimental***. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina,1982.

SEVERENCE, W S - ANDERSON, D G: ***How Plasma Arc Cutting Gases Affect Productivity***. Welding Journal, 35 - 39, 1984.

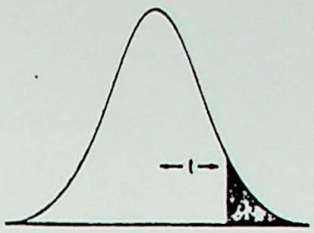
TORRES, V A: ***A Simple Analysis of Unreplicated Factorials With Possible Abnormalities***. Journal of Quality Technology, **volume 25**, 183 - 189, 1993.

WELLER, EJ - HAAVISTO, M: ***Nontraditional Machining Processes***. Society of Manufacturing Engineers, 1984.

WU, C F J - CHEN, Y: ***A Graph-Aided Method FOR planning Two-Level Experiments When Certain Interactions Are Important***, Journal of Quality Thecnology, **volume 34**, 162 - 175, 1987.

ANEXO 1

Pontos de probabilidade da distribuição t com ν graus de liberdade.



	Área de probabilidade									
ν	0.4	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005	0.0025	0.001	0.0005
1	0.325	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	127.32	318.31	636.62
2	0.289	0.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	14.089	22.326	31.598
3	0.277	0.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	7.453	10.213	12.924
4	0.271	0.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610
5	0.267	0.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869
6	0.265	0.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959
7	0.263	0.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.449	4.029	4.785	5.408
8	0.262	0.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041
9	0.261	0.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	3.690	4.297	4.781
10	0.260	0.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587
11	0.260	0.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437
12	0.259	0.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.428	3.930	4.318
13	0.259	0.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.372	3.852	4.221
14	0.258	0.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.326	3.787	4.140
15	0.258	0.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073
16	0.258	0.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.252	3.686	4.015
17	0.257	0.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965
18	0.257	0.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.197	3.610	3.922
19	0.257	0.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883
20	0.257	0.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.153	3.552	3.850
21	0.257	0.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.135	3.527	3.819
22	0.256	0.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792
23	0.256	0.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.104	3.485	3.767
24	0.256	0.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.091	3.467	3.745
25	0.256	0.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.078	3.450	3.725
26	0.256	0.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.067	3.435	3.707
27	0.256	0.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.057	3.421	3.690
28	0.256	0.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.047	3.408	3.674
29	0.256	0.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.038	3.396	3.659
30	0.256	0.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.030	3.385	3.646
40	0.255	0.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	2.971	3.307	3.551
60	0.254	0.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	2.915	3.232	3.460
120	0.254	0.677	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	2.860	3.160	3.373
∞	0.253	0.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	2.807	3.090	3.291

ANEXO 2

-Tabela de corte por plasma com Ar comprimido

Espessura de Corte		Corrente	Bico de corte	Ar comprimido		Distância entre bico e Obra		Velocidade no corte mecanizado [cm/min]		
[mm]	[pol]	(A)	[mm] (pol)	[kgf/cm^2] (psi)	[m^3/h] (pcm)	[mm]	[pol]	Aço baixo carbono	Aço Inoxidável	Alumínio
0.79	1/32	30	0.97	5.3	8.2	3.17	1/8	635	305	635
1.59	1/16	(100%	(0.038)	(75)	(4.8)			406	254	572
3.18	1/8	FT)						152	114	165
1.59	1/16	55	1.17	5.3	8.2	4.76	3/16	571	445	660
3.18	1/8	(100%	(0.046)	(75)	(4.8)			241	178	254
6.35	1/4	FT)						102	76	114
9.52	3/8							51	38	51
6.35	1/4	70	1.32	5.3	8.2	4.76	3/16	140	127	165
12.70	1/2	(50%	(0.052)	(75)	(4.8)			38	25	76
19.00	3/4	FT)						15	15	25

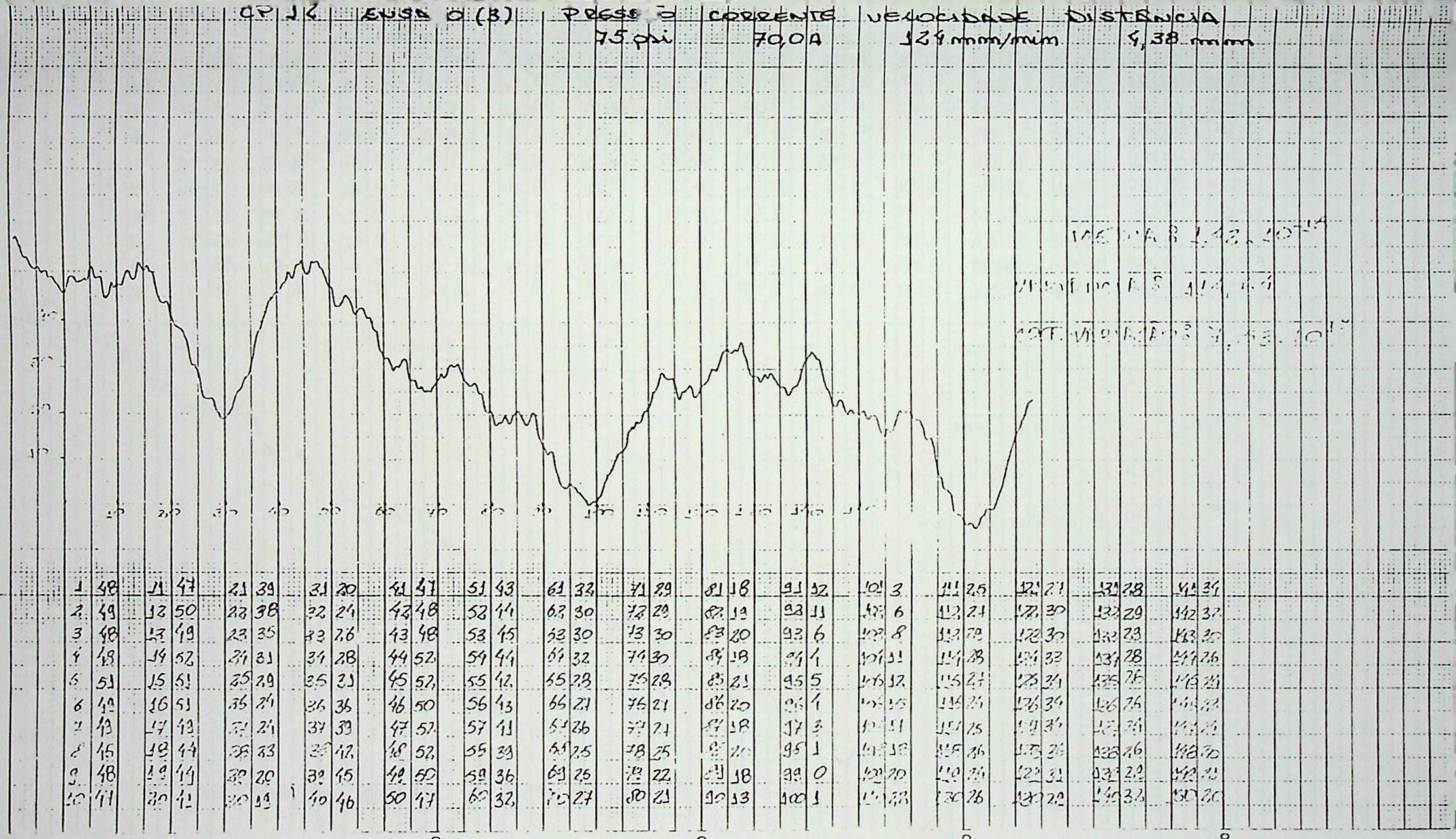
Parâmetros de corte Plasmarc C-70 (white-martins)

ANEXO 3

300psi 62,5A 324mm/min 4,38mm



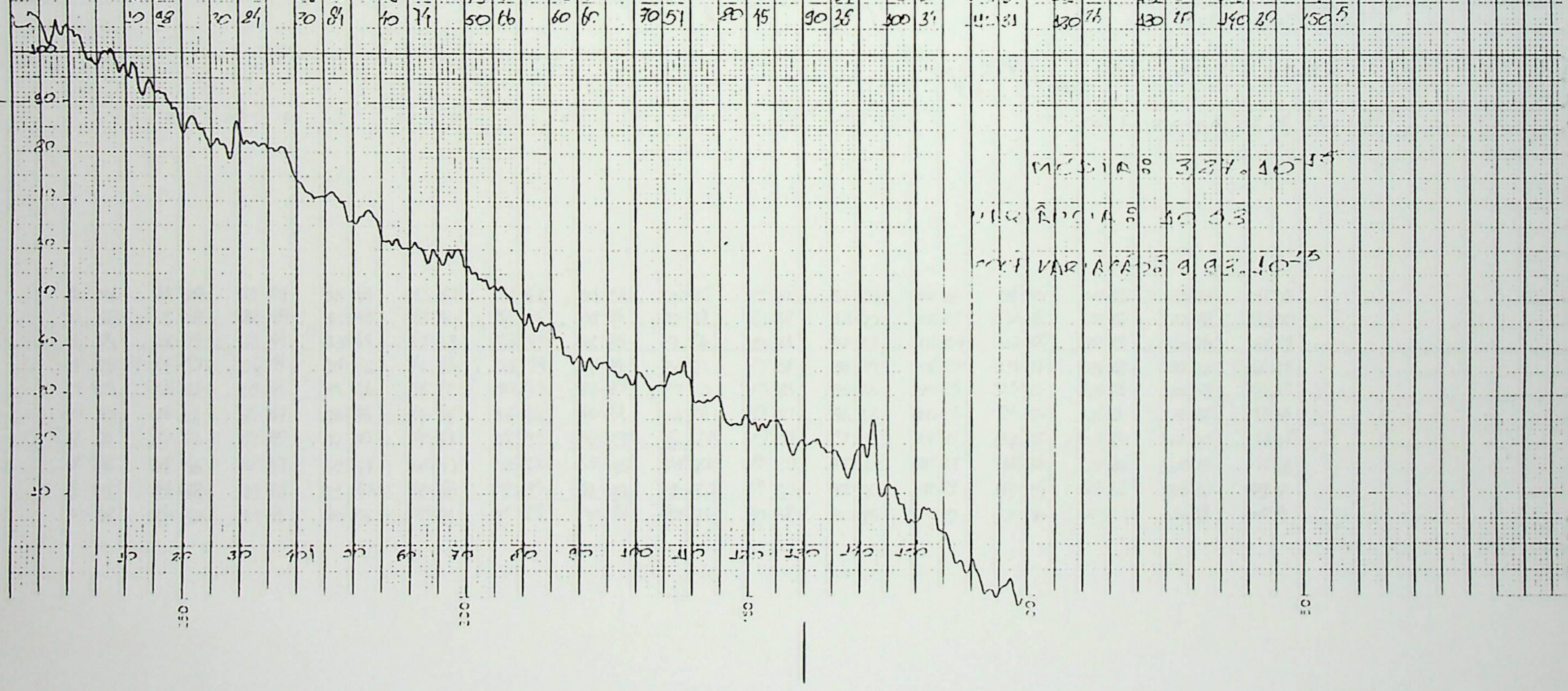
CP 12 EIXO 0 (B) PRESS 75 psi CORRENTE 70,0A VELOCIDADE 124 mm/min DISTÂNCIA 4,38 mm



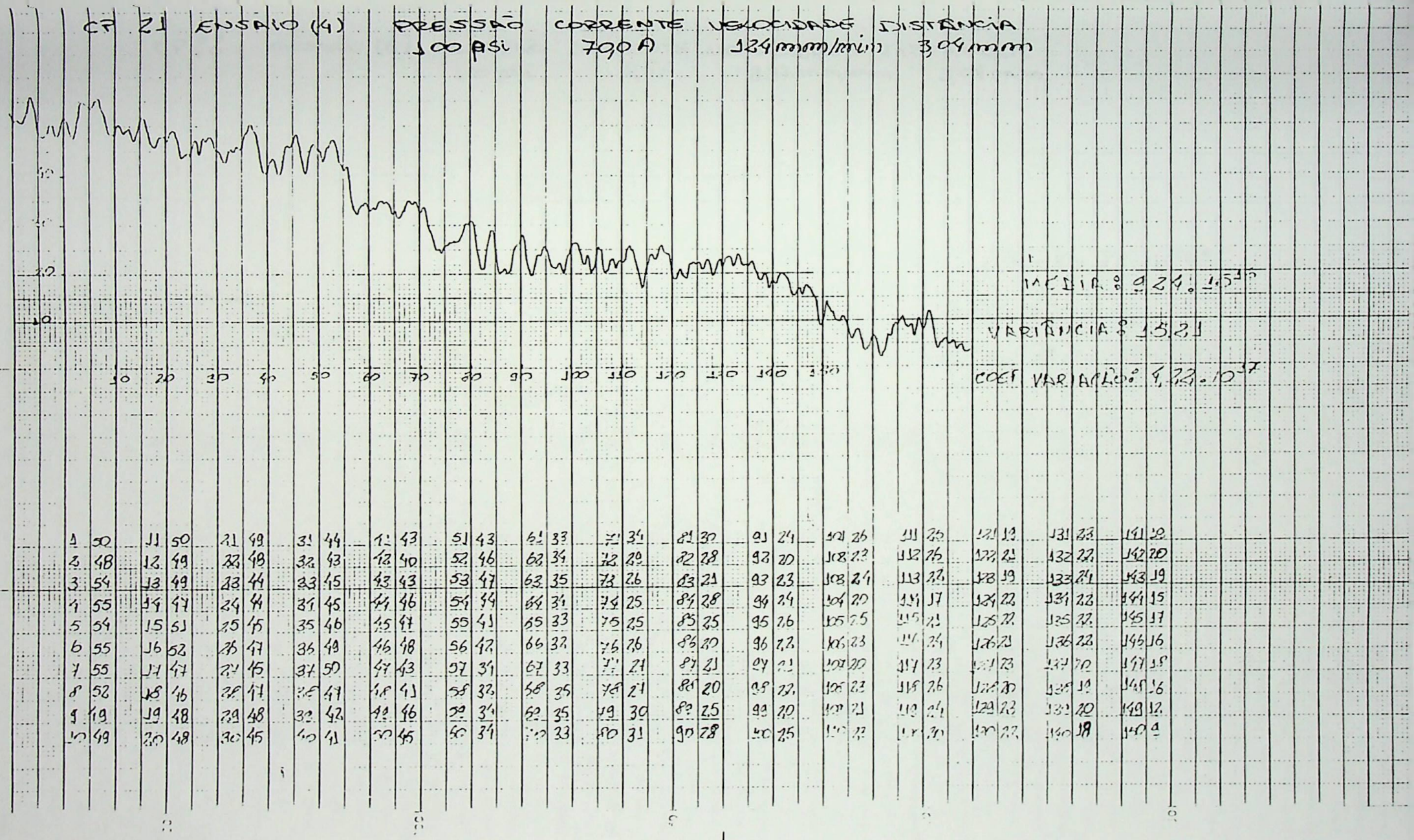
1	48	11	47	21	39	31	30	41	37	51	43	61	33	71	29	81	18	91	32	101	3	111	26	121	27	131	28	141	31		
2	49	12	50	22	38	32	24	42	48	52	41	62	30	72	29	82	19	92	11	102	6	112	24	122	30	132	29	142	32		
3	48	13	49	23	35	33	26	43	48	53	45	63	30	73	30	83	20	93	6	103	8	113	29	123	30	133	23	143	30		
4	48	14	52	24	31	34	28	44	52	54	44	64	32	74	30	84	18	94	1	104	11	114	28	124	33	134	28	144	26		
5	51	15	51	25	29	35	31	45	52	55	42	65	28	75	28	85	21	95	5	105	12	115	27	125	31	135	26	145	23		
6	49	16	51	26	24	36	36	46	50	56	43	66	27	76	27	86	20	96	1	106	15	116	26	126	34	136	26	146	22		
7	43	17	43	27	24	37	39	47	52	57	41	67	26	77	24	87	18	97	3	107	11	117	25	127	36	137	24	147	23		
8	45	18	44	28	33	38	42	48	52	55	39	68	25	78	25	88	20	98	1	108	18	118	26	128	36	138	26	148	20		
9	48	19	41	29	20	39	45	49	50	59	36	69	25	79	22	89	18	99	0	109	20	119	26	129	31	139	29	149	21		
10	41	20	41	30	19	40	46	50	47	60	32	70	27	80	21	90	13	100	1	110	23	120	26	130	29	140	34	150	20		

C: 13 EPSA-0 (4) PRESSÃO 1000 psi CORRENTE 70,0 A VELOCIDADE 124 mm/min DISTÂNCIA 3,04 mm

1	104	11	95	21	87	31	82	41	73	51	65	61	62	71	55	81	47	91	35	101	35	111	29	121	24	131	20	141	19
2	108	12	97	22	87	32	82	42	72	52	64	62	60	72	55	82	44	92	38	102	33	112	28	122	23	132	21	142	21
3	100	13	92	23	85	33	82	43	71	53	68	63	58	73	51	83	45	93	35	103	33	113	29	123	24	133	20	143	16
4	93	14	91	24	83	34	82	44	71	54	66	64	60	74	57	84	45	94	31	104	32	114	30	124	25	134	19	144	10
5	98	15	92	25	83	35	81	45	71	55	62	65	53	75	53	85	45	95	31	105	33	115	29	125	25	135	19	145	12
6	100	16	92	26	83	36	81	46	72	56	62	66	51	76	53	86	42	96	34	106	35	116	25	126	23	136	18	146	11
7	100	17	92	27	82	37	81	47	71	57	61	67	59	77	51	87	39	97	31	107	30	117	24	127	21	137	16	147	9
8	100	18	89	28	83	38	81	48	70	58	62	68	59	78	49	88	38	98	34	108	31	118	26	128	25	138	13	148	7
9	96	19	88	29	86	39	77	49	66	59	60	69	60	79	41	89	37	99	32	109	29	119	26	129	20	139	17	149	5
10	98	20	84	30	81	40	74	50	66	60	60	70	51	80	45	90	36	100	31	110	31	120	26	130	20	140	20	150	5

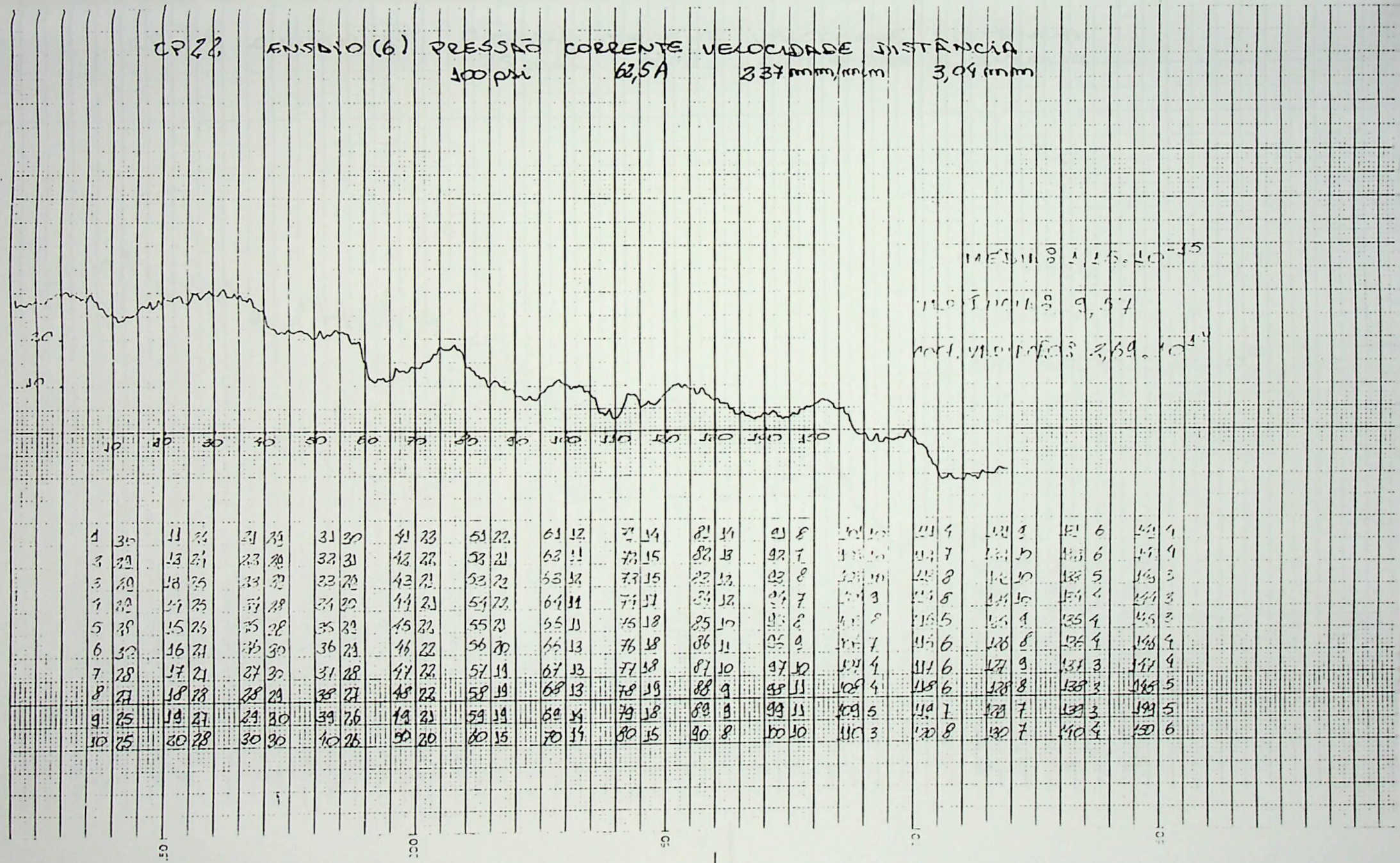


CP 21 ENSAIO (4) PRESSÃO 100 psi CORRENTE 70,0 A VELOCIDADE 134 mm/min DISTÂNCIA 3,04 mm

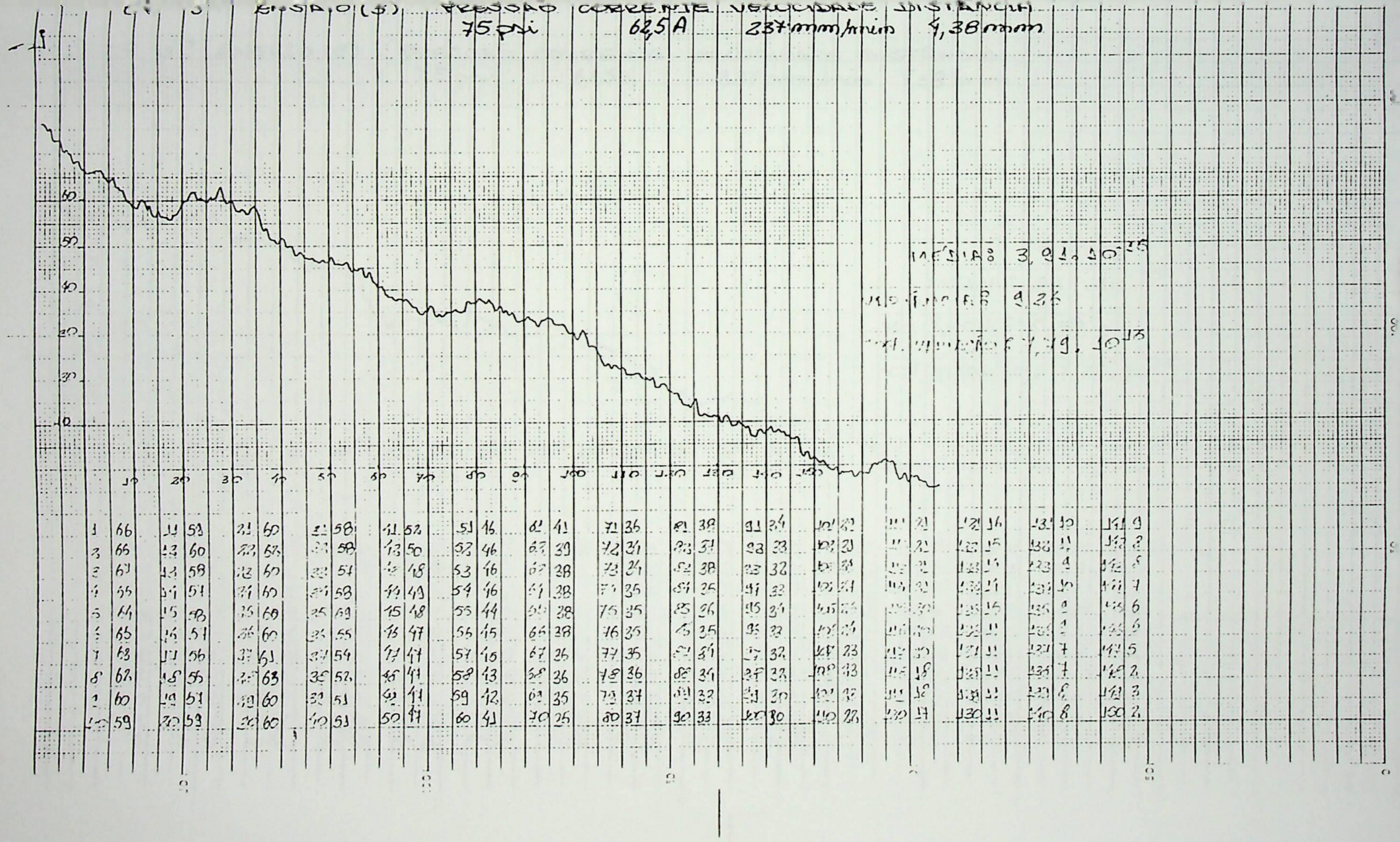


1	50	11	50	21	49	31	44	41	43	51	43	61	33	71	34	81	30	91	24	101	26	111	25	121	19	131	23	141	20
2	48	12	49	22	48	32	43	42	40	52	46	62	34	72	29	82	28	92	20	102	23	112	26	122	21	132	22	142	20
3	54	13	49	23	44	33	45	43	43	53	47	63	35	73	26	83	21	93	23	103	24	113	22	123	19	133	24	143	19
4	55	14	47	24	44	34	45	44	46	54	44	64	31	74	25	84	28	94	24	104	20	114	17	124	22	134	22	144	15
5	54	15	51	25	45	35	46	45	47	55	41	65	33	75	25	85	25	95	26	105	25	115	21	125	22	135	22	145	17
6	55	16	52	26	47	36	48	46	48	56	42	66	32	76	26	86	20	96	22	106	23	116	24	126	21	136	22	146	16
7	55	17	47	27	45	37	50	47	43	57	31	67	33	77	27	87	21	97	21	107	20	117	23	127	23	137	20	147	19
8	52	18	46	28	47	38	47	48	41	58	33	68	35	78	27	88	20	98	22	108	23	118	26	128	20	138	19	148	16
9	49	19	48	29	48	39	42	49	46	59	34	69	35	79	30	89	25	99	20	109	21	119	24	129	22	139	20	149	12
10	49	20	48	30	45	40	41	50	45	60	34	70	33	80	31	90	28	100	25	110	22	120	20	130	22	140	18	150	9

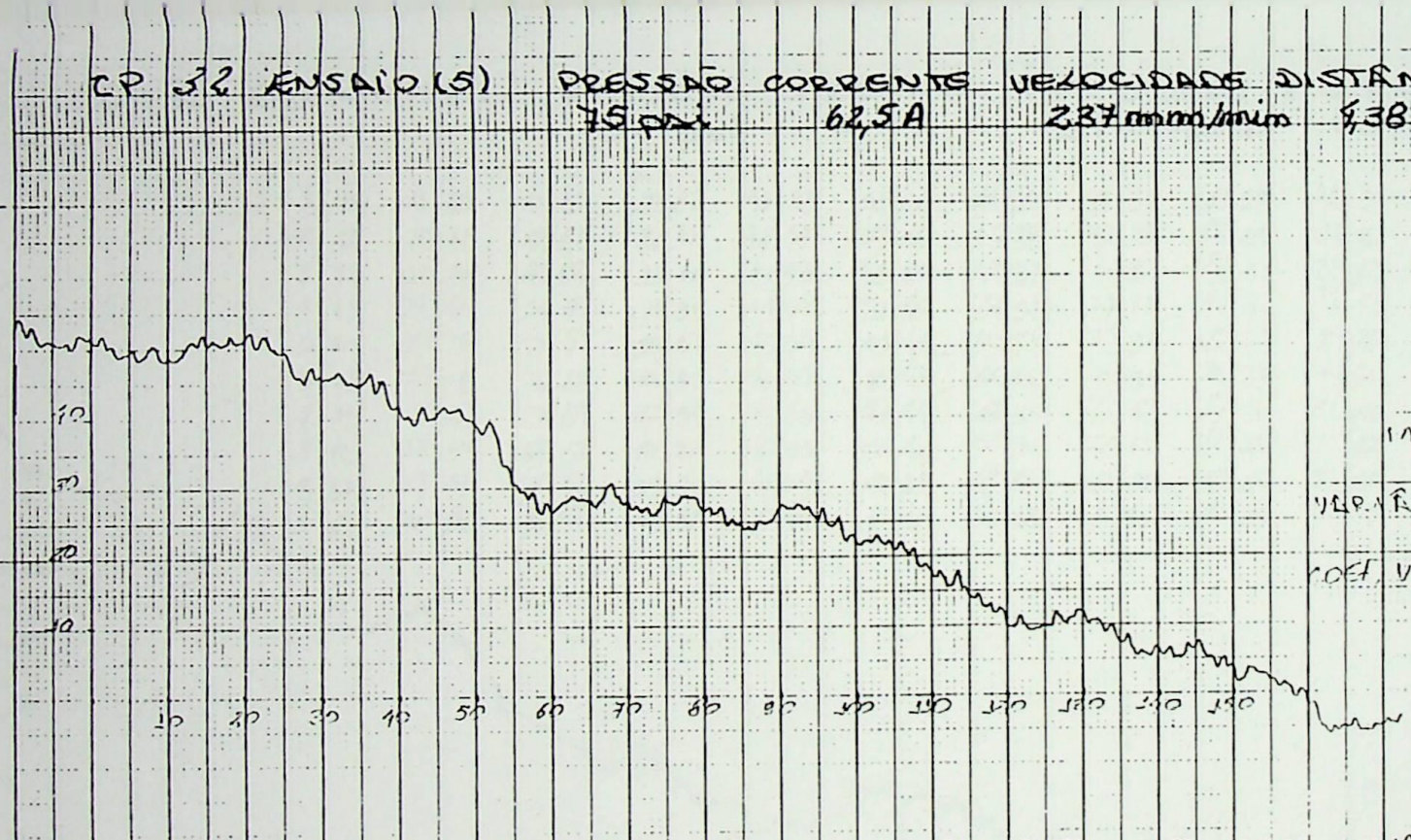
CP 28 ENSAIO (6) PRESSÃO CORRENTE VELOCIDADE DISTÂNCIA
100 psi 62,5A 2,37 mm/min 3,94 mm

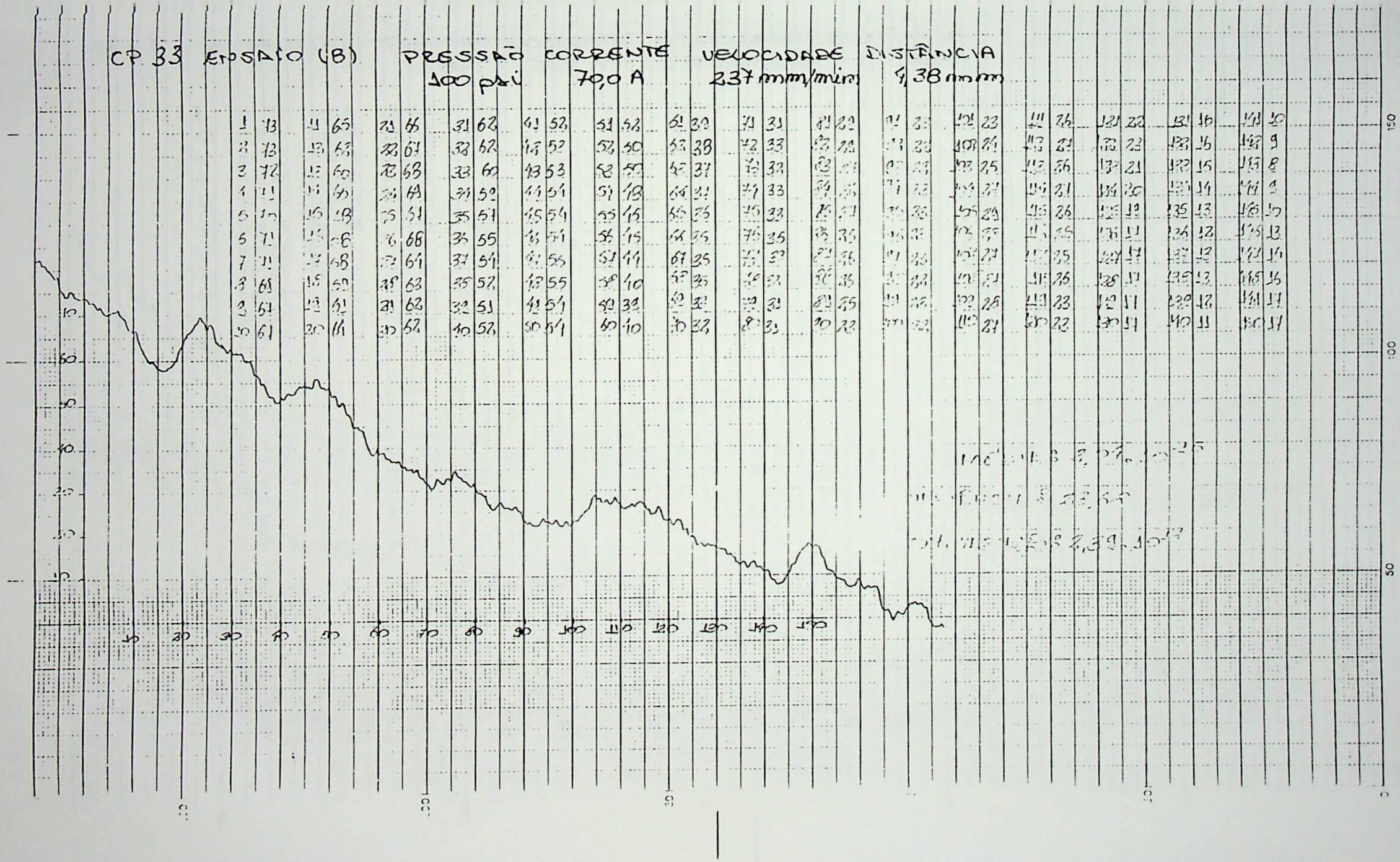


CP 23 ENSAIO (1) PRESSÃO 75 psi CORRENTE 62,5 A VELOCIDADE 124 mm/min DISTÂNCIA 3,09 mm


75 psi
62,5 A
237 mm/min
4,38 mm

CP 32 ENSAIO (5) PRESSÃO CORRENTE VELOCIDADE DISTÂNCIA
75 psi 62,5A 237 mm/min 6,38 mm




CP 33 ENSAIO (B) PRESSÃO CORRENTE VELOCIDADE DISTÂNCIA
100 psi 70,0 A 237 mm/min 4,38 mm

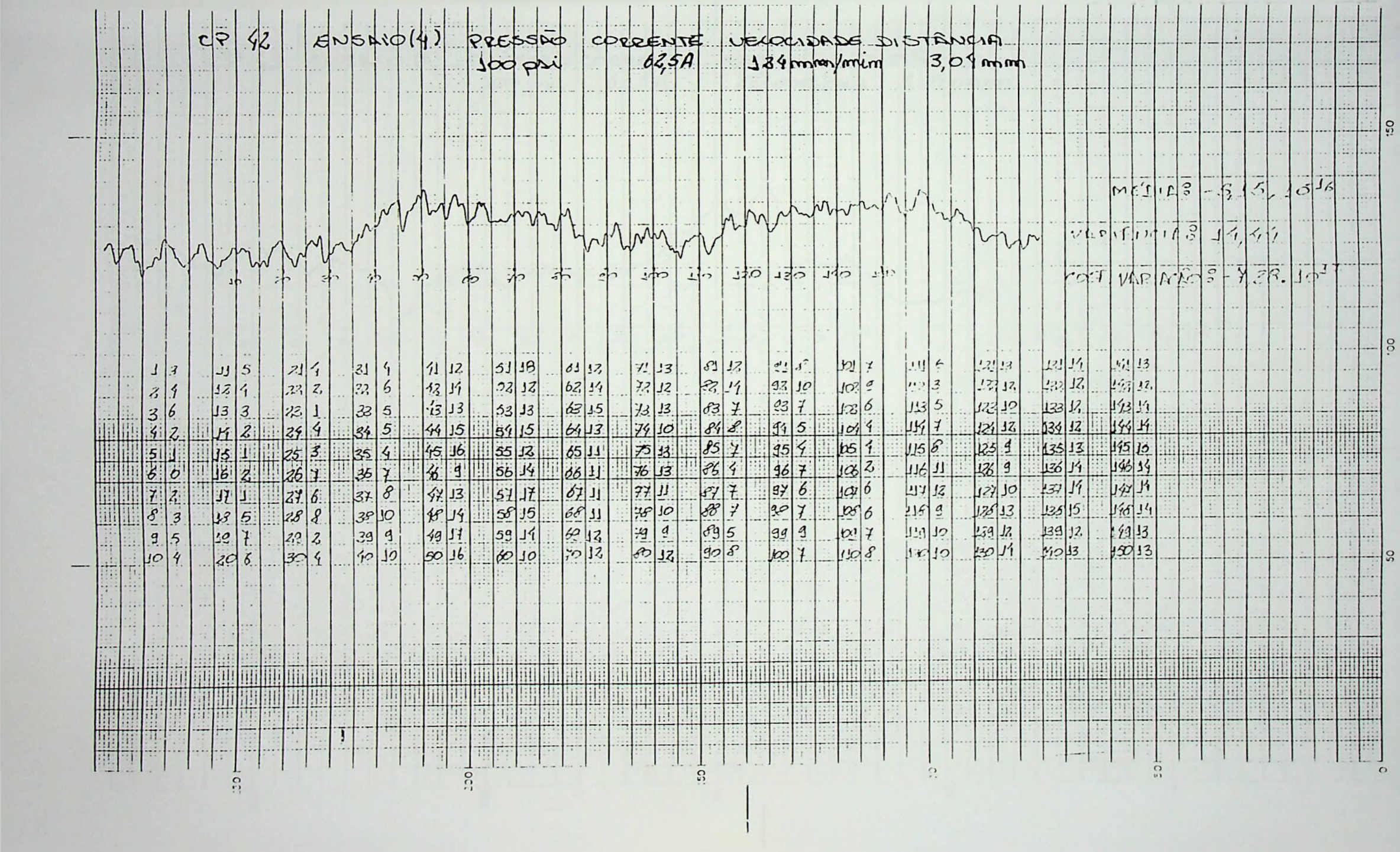
CP 41 ENSAIO (7) PRESSÃO 75 psi CORRENTE 70,0 A VELOCIDADE 237 mm/min DISTÂNCIA 3,04 mm

1	43	11	40	32	36	31	40	41	36	51	33	51	31	77	33	81	22	91	13	102	19	111	21	121	11	131	10	141	16	
2	42	13	40	33	29	33	40	43	35	53	30	62	31	73	30	82	23	93	17	102	18	115	20	123	9	133	10	141	14	
3	43	15	40	33	31	33	28	43	33	53	31	63	32	73	29	83	21	93	14	103	18	113	17	123	11	133	12	141	11	
4	43	15	39	35	28	31	31	44	34	54	27	65	33	73	25	83	21	93	15	104	15	114	16	124	11	131	14	141	11	
5	42	15	43	35	40	35	38	45	33	55	32	65	31	75	27	85	21	95	18	105	16	115	15	125	11	135	13	146	12	
6	40	16	38	35	40	36	35	46	33	56	33	66	34	76	26	86	20	96	19	106	17	116	16	126	12	136	13	146	11	
7	40	17	31	37	41	37	34	47	30	57	23	67	37	77	31	87	21	97	17	107	17	117	13	127	13	137	13	147	11	
8	40	18	38	36	41	38	35	48	33	58	33	68	34	78	26	88	19	98	19	108	13	118	13	128	11	138	13	148	11	
9	40	19	38	38	40	39	33	49	30	59	30	69	32	79	23	89	18	99	11	109	19	119	12	129	10	139	14	149		
10	40	20	31	30	40	40	34	50	30	60	30	70	32	80	23	90	17	100	15	110	20	120	12	130	9	140	14	150		

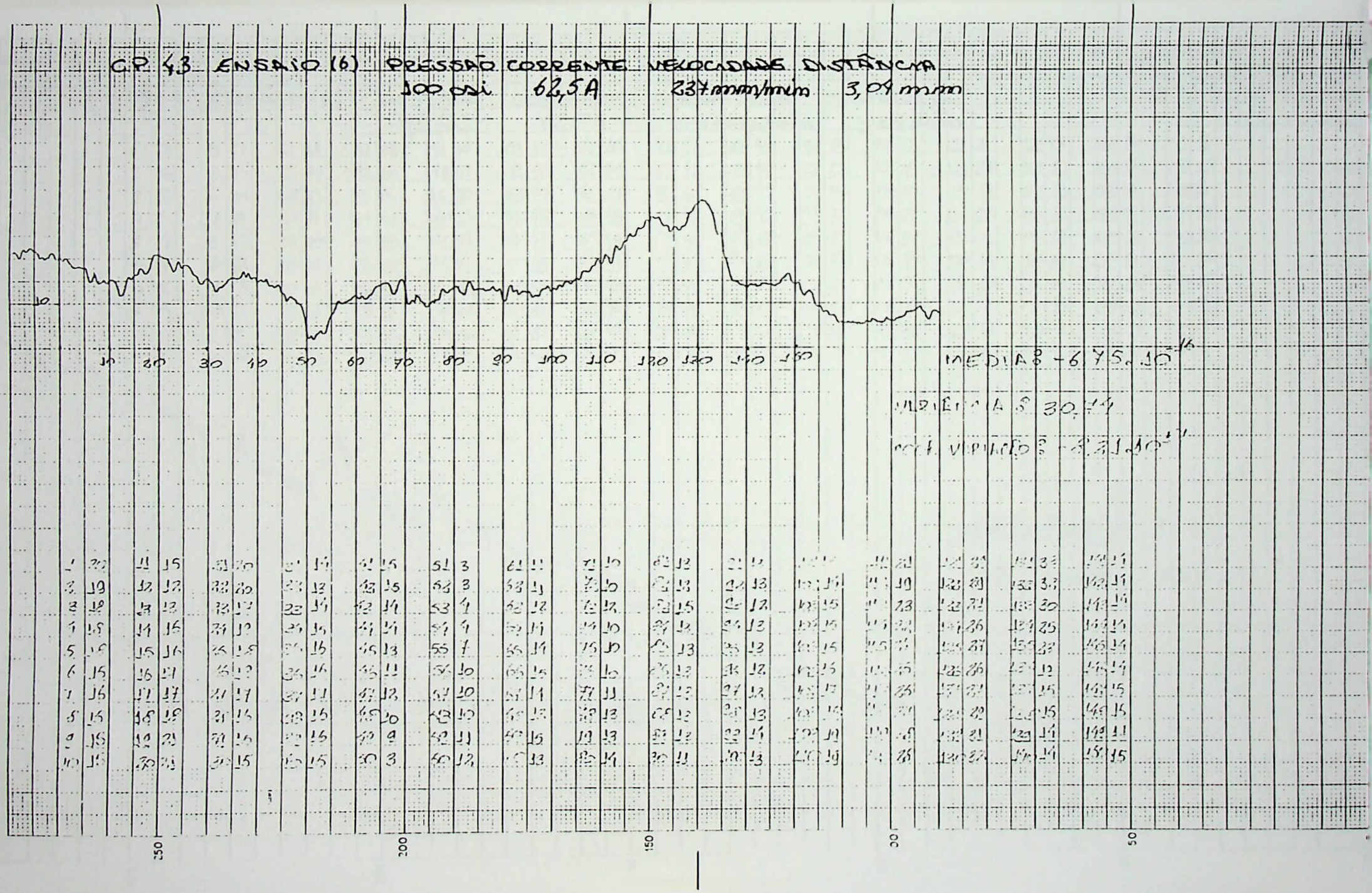
MÉDIA : $-1,20 \cdot 10^{-16}$

VARIÂNCIA : 7,35

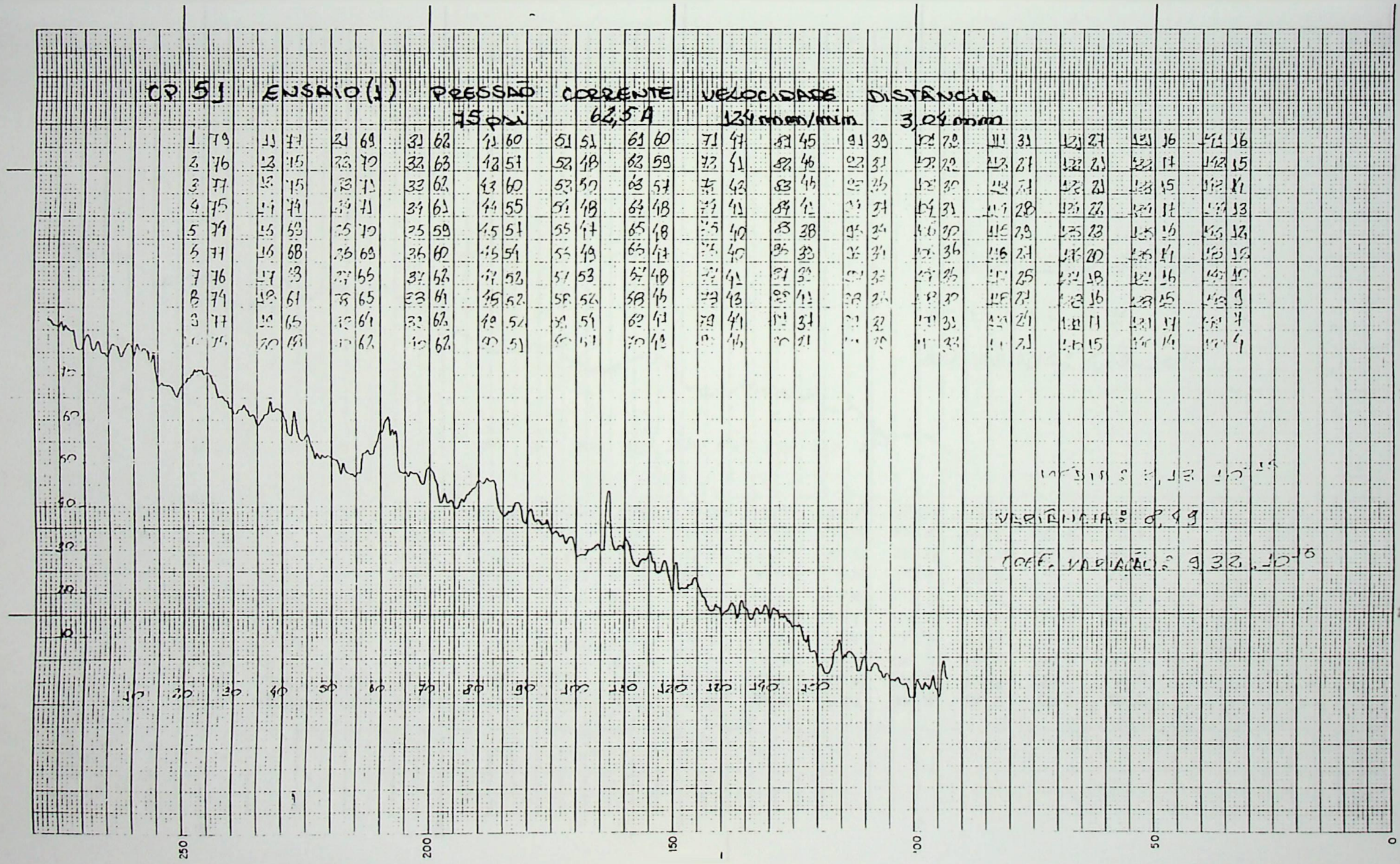
DESVIO PADRÃO : $2,76 \cdot 10^{-18}$


CP 42 ENSAIO(4) PRESSÃO CORRENTE VELOCIDADE DISTÂNCIA
100 psi 62,5A 134 mm/min 3,09 mm

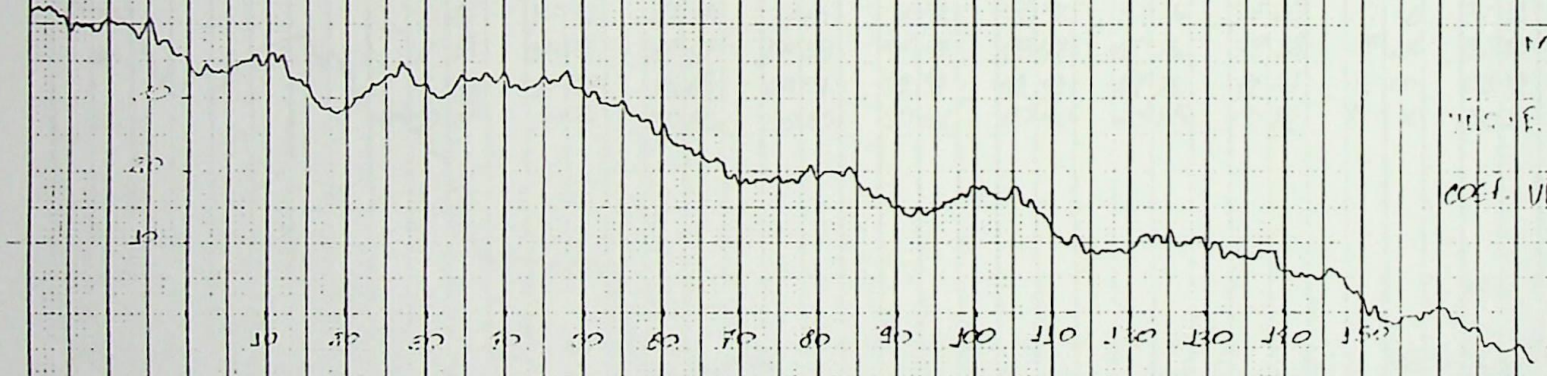
CP 43 ENSAIO (6) PRESSÃO CORRENTE VELOCIDADE DISTÂNCIA
100 psi 62,5A 237 mm/min 3,04 mm



CP 51 ENSAIO (1) PRESSÃO 75 psi CORRENTE 62,5 A VELOCIDADE 134 mm/min DISTÂNCIA 3,04 mm

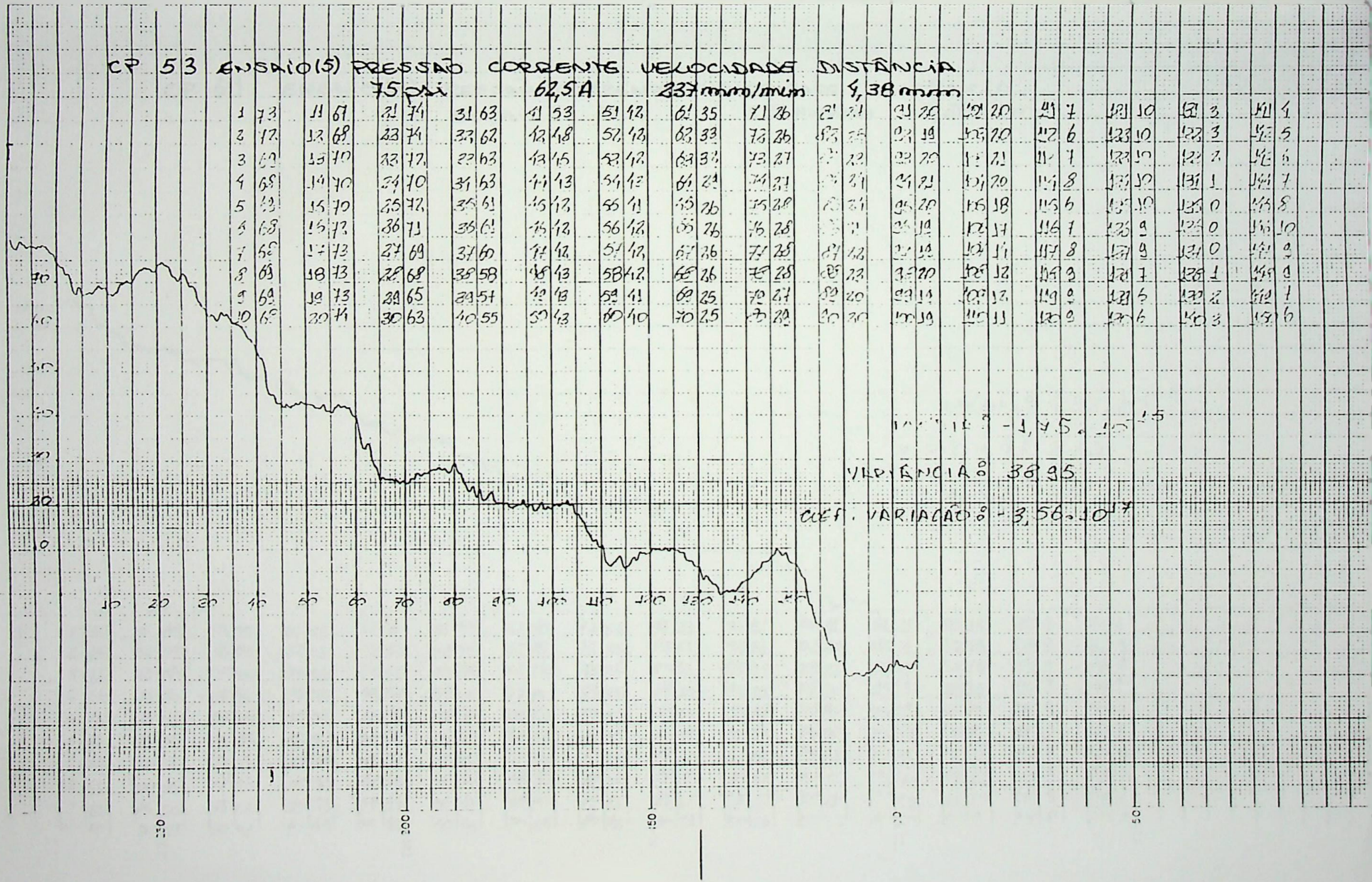


CP 52 ENSAIO (8) PRESSÃO 100 psi CORRENTE 70,0 A VELOCIDADE 237 mm/min DISTÂNCIA 4,38 mm

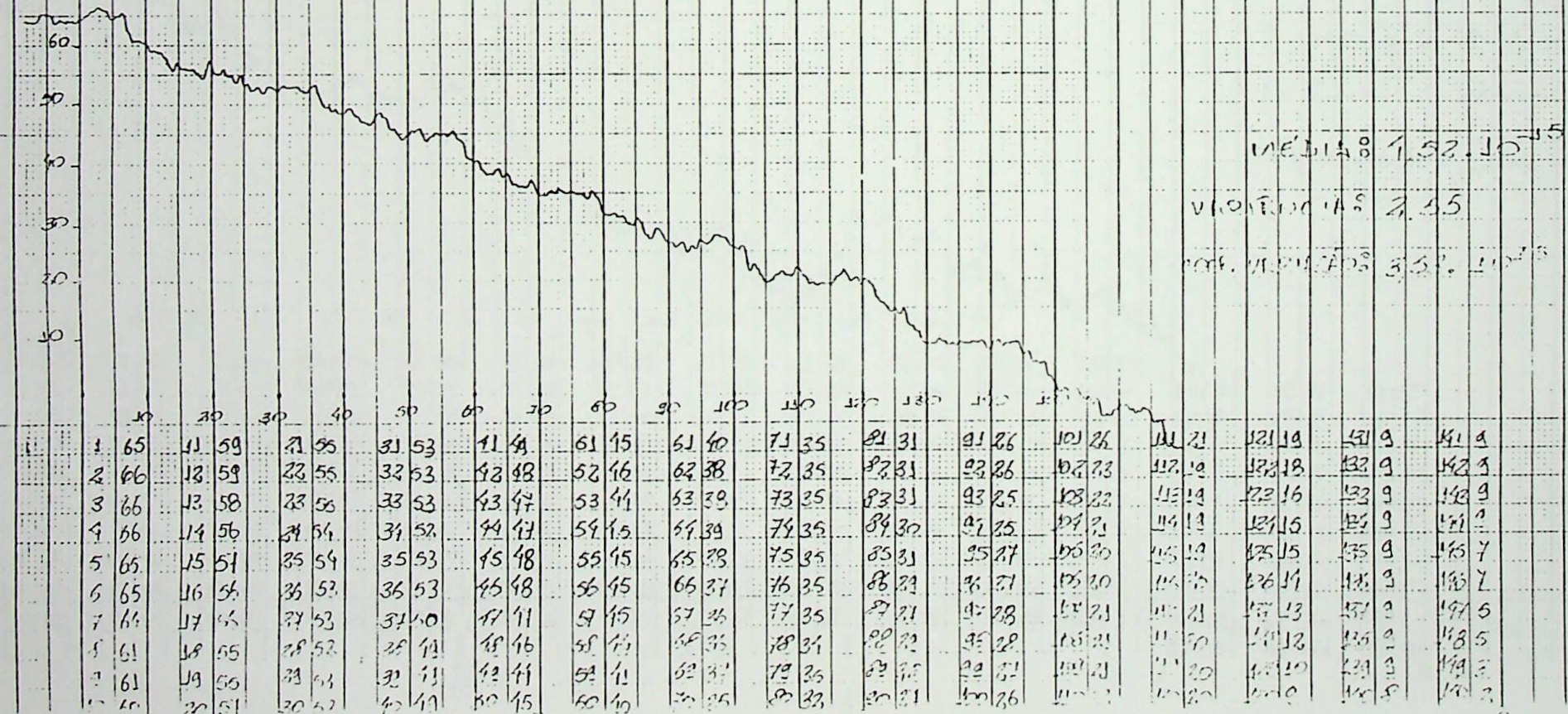


| | | |

CP 53 ENSAIO(5) PRESSÃO CORRENTE VELOCIDADE DISTÂNCIA
75 psi 62,5A 237 mm/min 4,38 mm



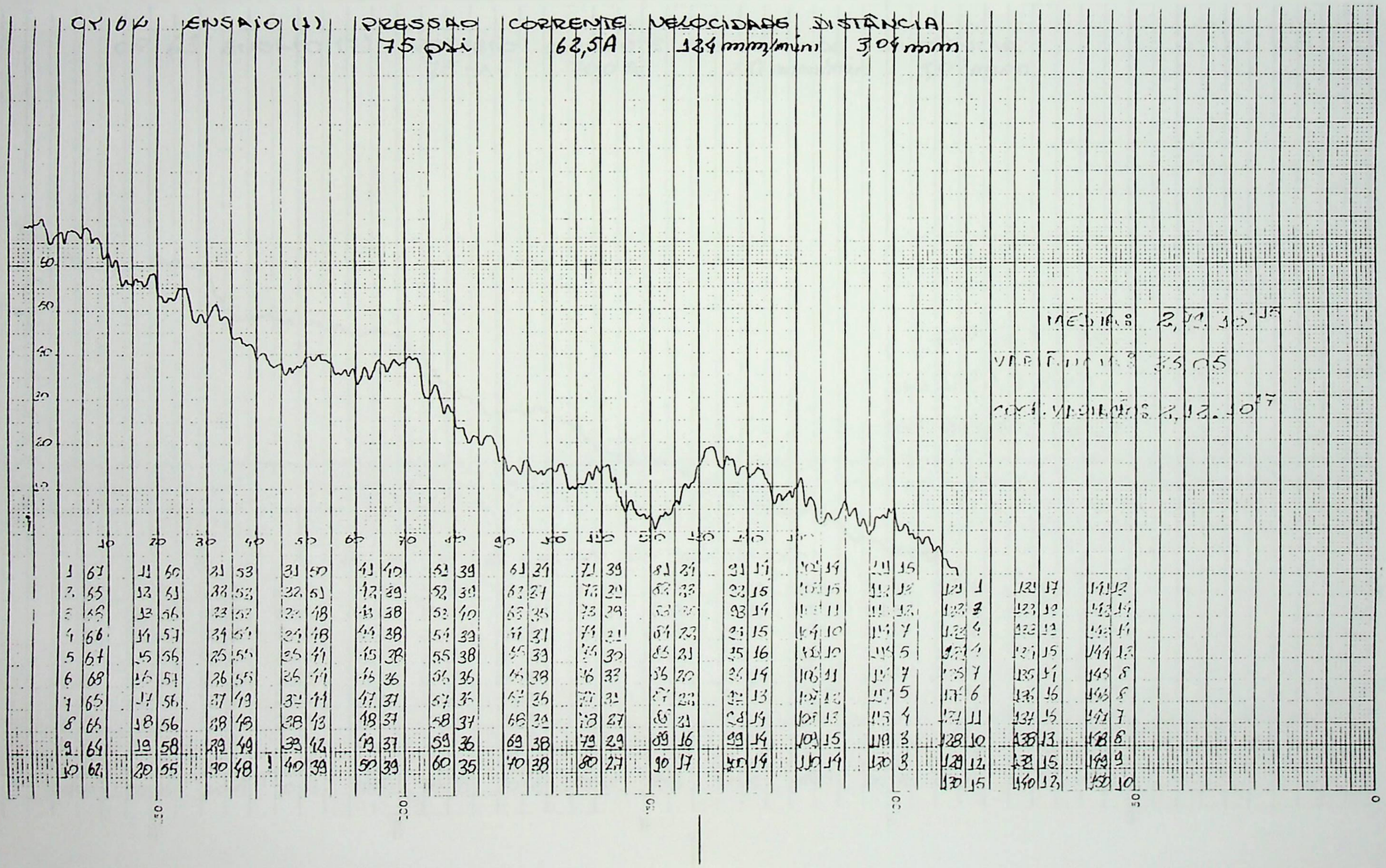
CP 61 ENSAIO (8) PRESSÃO 100 psi CORRENTE 70A VELOCIDADE 2,37 mm/min DISTÂNCIA 4,38 mm



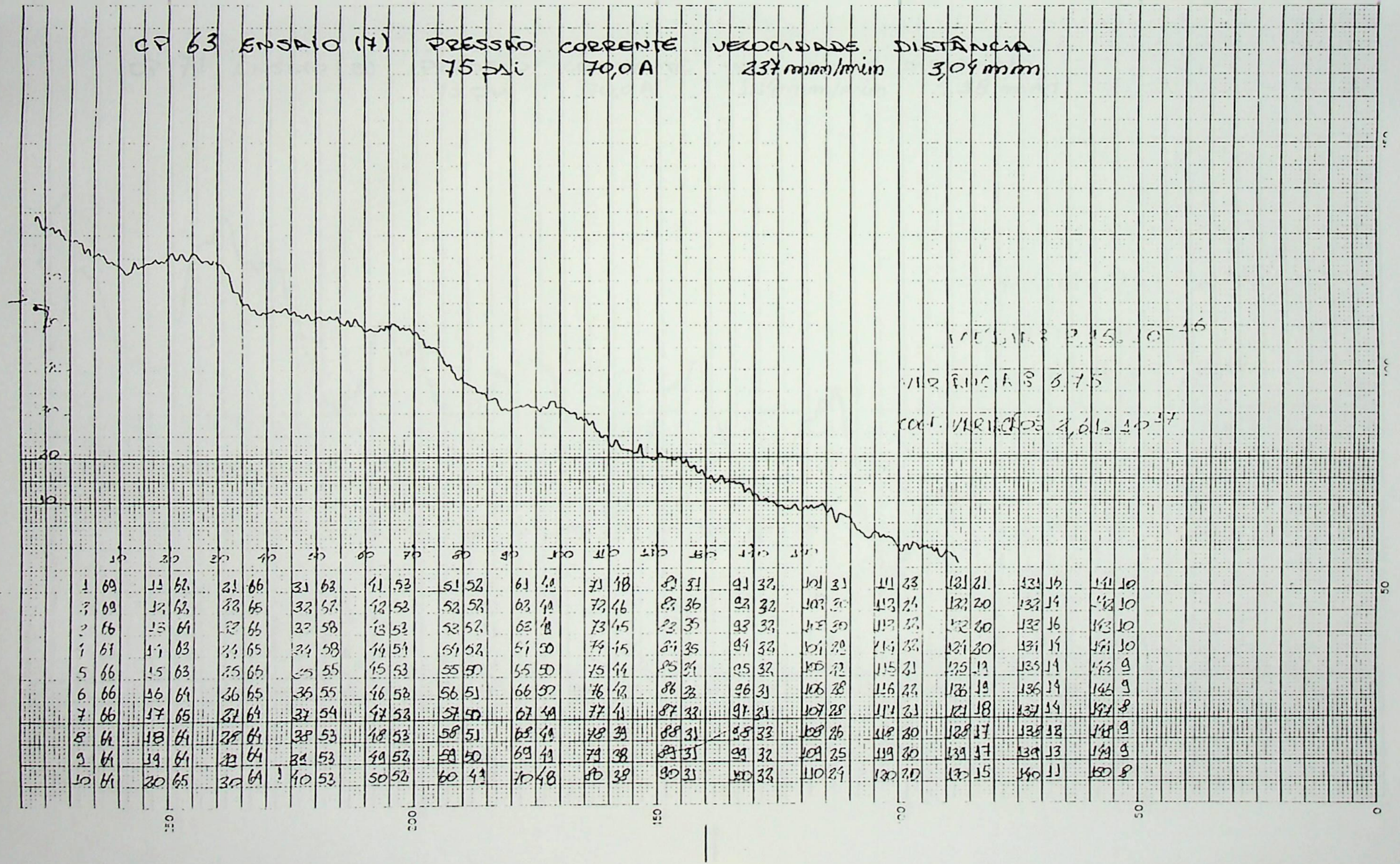
MÉDIA 1,52.10⁻⁵

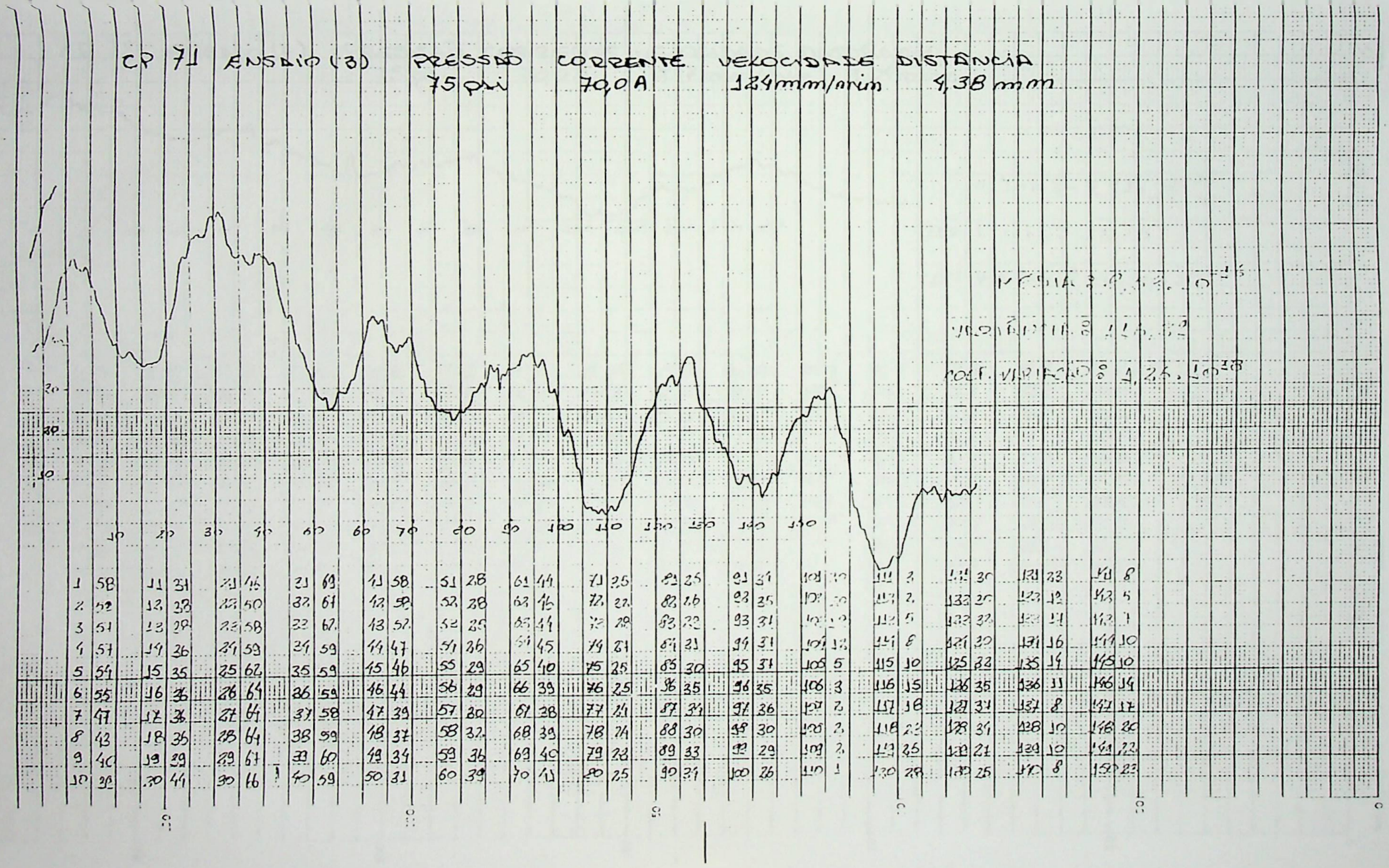
VARIÂNCIA 2,45

POT. MÍNIMOS 5,5.10⁻⁵

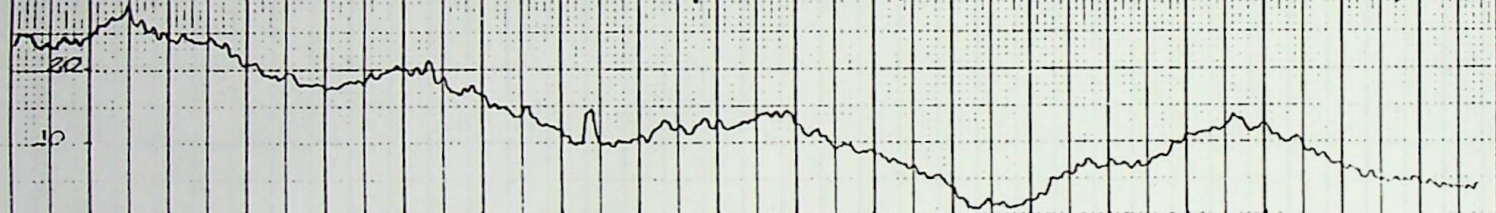

CY 6K ENSAIO (1) PRESSÃO CORRENTE VELOCIDADE DISTÂNCIA
75 psi 62,5A 134 mm/min 3,04 mm

CP 63 ENSAIO (7) PRESSÃO CORRENTE VELOCIDADE DISTÂNCIA
75 psi 70,0 A 237 mm/min 3,04 mm




CP 71 ENSAIO (3) PRESSÃO CORRENTE VELOCIDADE DISTÂNCIA
75 psi 70,0 A 124 mm/min 4,38 mm

CP 72 ENSAIO (7) PRESSÃO CORRENTE VELOCIDADE DISTÂNCIA
75 psi 70,0A 237 mm/min 3,04 mm



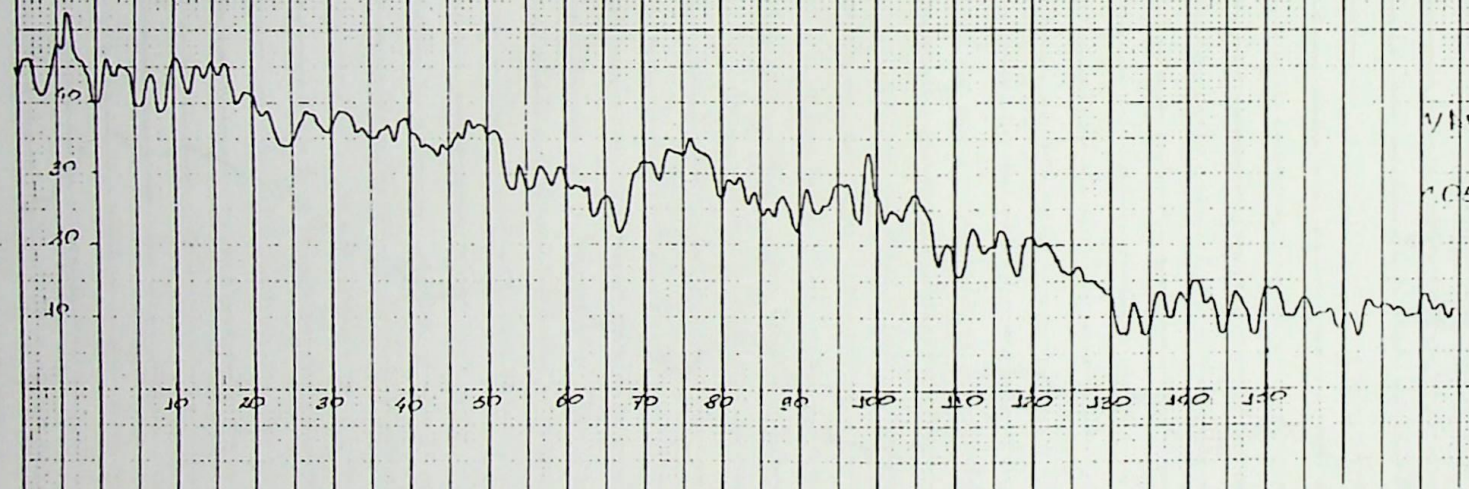
MÉDIA = 3,31 · 10⁻⁵

VAR = 1,03 · 10⁻⁹

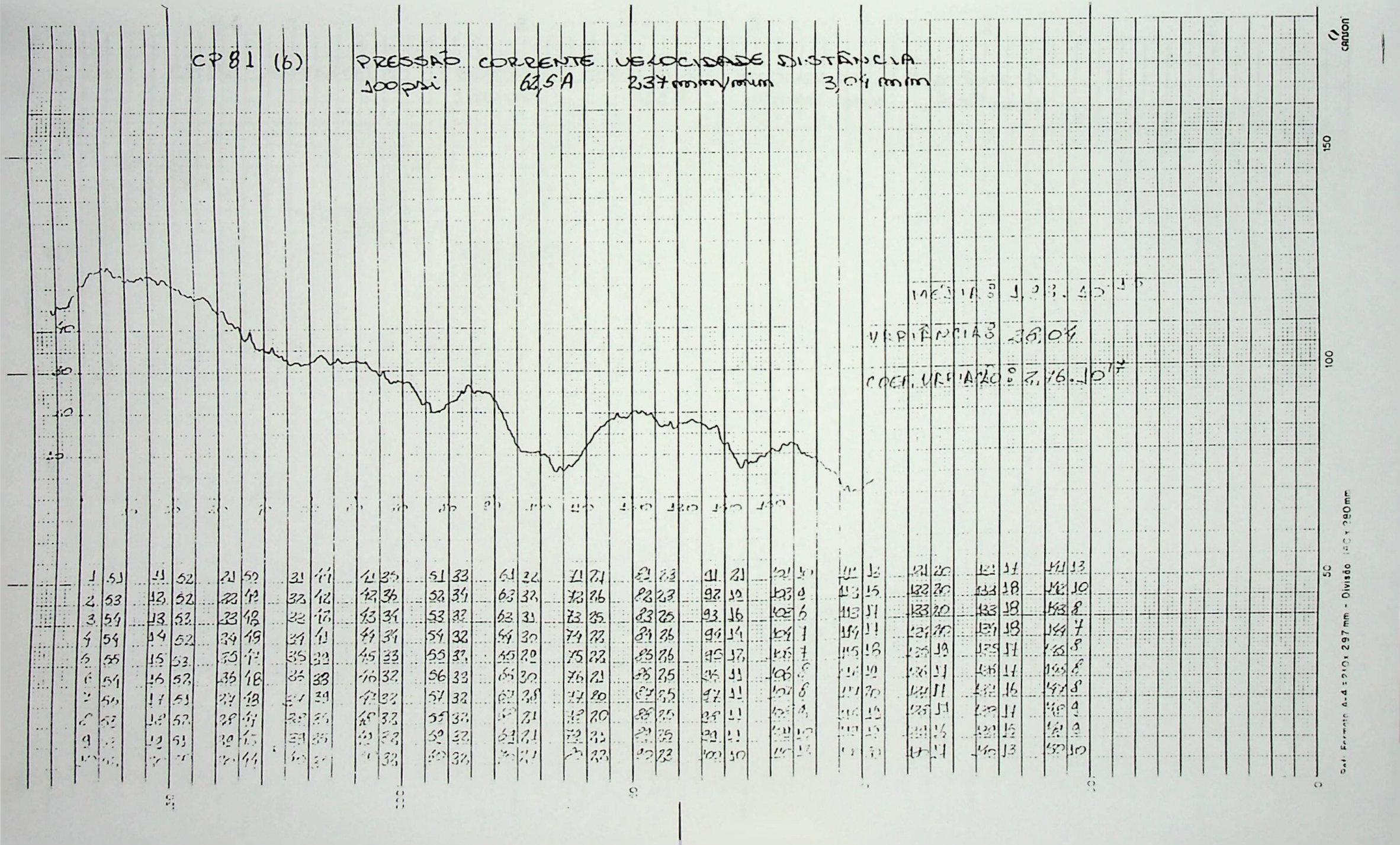
COEF VARIAÇÃO = 3,06 · 10⁻⁷

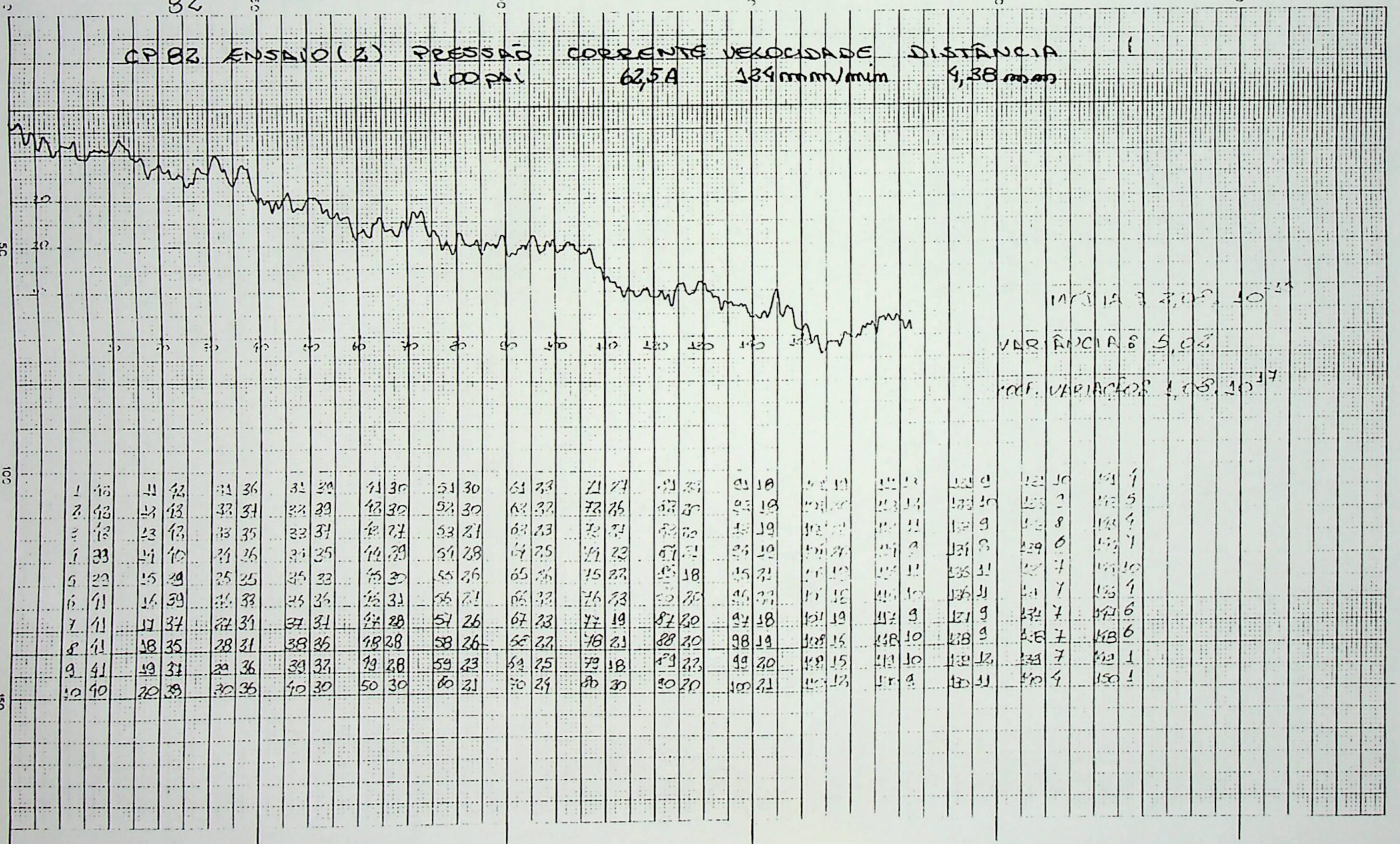
| | | |

CP 73 ENSAIO (3) PRESSÃO CORRENTE VELOCIDADE DISTÂNCIA
75 psi 70,0 A 324 mm/min 4,38 mm



| | | |


CP 81 (6)
PRESSÃO 100 psi
CORRENTE 62,5 A
VELOCIDADE 237 mm/min
DISTÂNCIA 3,04 mm
CANION



Ref: Formato A-4 = 210x 297 mm - Divisão 150 x 280 mm

CANSON

CP 83 ENSAIO (2) PRESSÃO 100 psi CORRENTE 62,5A VELOCIDADE 12½ mm/min DISTÂNCIA 4,38 mm

