

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL  
DA TESE DEFENDIDA POR Deoclécio  
Damasceno E APROVADA PELA  
COMISSÃO JULGADORA EM 13/12/93

ORIENTADOR

Título:

**ANÁLISE DAS TENSÕES  
RESIDUAIS APÓS  
TORNEAMENTO E  
RETIFICAÇÃO DO AÇO  
ABNT 52100 ENDURECIDO**

Publicação FEM: **Nº 51/93**

Autor:

**DEOCLÉCIO DAMASCENO**

Orientador:

**Prof. Dr. NIVALDO LEMOS CUPINI**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO  
APRESENTADA À UNIVERSIDADE DE  
CAMPINAS COMO REQUISITO  
PARCIAL À OBTENÇÃO DO TÍTULO  
DE MESTRE EM ENGENHARIA  
MECÂNICA.**

Campinas, Dezembro de 93

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Dissertação de Mestrado

**Título:** ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS APÓS  
TORNEAMENTO E RETIFICAÇÃO DO AÇO  
ABNT 52100 ENDURECIDO

**Autor:** DEOCLÉCIO DAMASCENO 118


**Orientador:** Prof. Dr. NIVALDO LEMOS CUPINI +

Aprovado por



---

Prof. Dr. Nivaldo Lemos Cupini



---

Profª. Drª. Roseana da Exaltação Trevisan

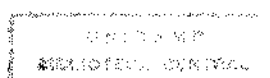


---

Prof. Dr. Claudionor Cruz

Campinas, Dezembro de 93

II



## **AGRADECIMENTOS**

Agradecer é uma palavra que exprime muito do interior do ser humano.

Agradecer é saber reconhecer, ter sabedoria de constatar uma dádiva concebida.

Agradecer é contribuir por realizações que envolvam os mais variados aspectos filantropicos.

Agradecer não é apenas um processo de citar nomes.

Apenas direi que jamais esquecerei aqueles que, sem esperar retorno, colaboraram na execução deste trabalho.

## RESUMO

Com as recentes melhorias em máquinas de medir tensões residuais através da difração de raios-x, o interesse no conhecimento e controle dessas tensões tem aumentado muito. De fato, esse interesse tem fundamento, em função das mesmas proporcionarem melhoras significativas no limite de resistência à fadiga dos materiais. Neste trabalho, fez-se um estudo comparativo referente ao comportamento das tensões residuais superficiais obtidas através da retificação e do torneamento do aço (ABNT 52100) em condições de acabamento, sendo usados para tanto, rebolo de óxido de alumínio e insertos cerâmicos. Constatou-se que a substituição das operações de retificação pela de torneamento é tecnicamente viável. Os níveis de tensões residuais encontrados para os mesmos níveis de rugosidade superficial impostos pela aplicação dos dois processos são similares.

## **ABSTRACT**

With the recent improvement on machines to measure residual stress through x-ray diffraction, the interest on the knowledge to control such stress has increased greatly. In fact, this interest has its basis due to the fact the stress, itself provides significative improvement on the strength limit to materials fatigue. In this report, a comparative study was done upon the behavior of surface residual stress obtained from grinding and turning of the steel (ABNT 52100) on finishing conditions. For so aluminium oxide wheel was used as well as ceramic inserts. It was revealed that the substitution of the grinding operations by the turning ones is technically possible. The levels of residual stress were found to be the same levels of surface roughness imposed by the application of both processes are similar.

# ÍNDICE

<b>CAP. 1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>CAP. 2</b>	<b>CARACTERÍSTICAS TEÓRICA DOS PROCESSOS DE RETIFICAÇÃO E TORNEAMENTO</b>	<b>3</b>
2.1	As operações de retificação e suas características geométricas	5
2.1.1	O diâmetro equivalente ou conformidade (De)	6
2.1.2	Espessura de corte equivalente	9
2.2	A ferramenta utilizada no Processo de Retificação	11
2.2.1	O material abrasivo	11
2.2.2	Desgaste do Rebolo e Agressividade	14
2.3	A caracterização Topográfica de Rebolos	14
2.3.1	Parâmetros e método para caracterização topográfica	15
2.4	Forças de Corte na Retificação	15
2.5	CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS DE TORNEAMENTO	16
2.5.1	Propriedades do Material da peça	17
2.5.2	Parâmetros de corte requerido	17
2.5.3	Formação de Cavaco	18
2.5.4	Rugosidade Superficial	18
2.5.5	Integridade Superficial	19
2.5.6	Forças de Usinagem	20
2.6.	APLICAÇÕES DE FERRAMENTAS DE MATERIAL CERÂMICO NA USINAGEM DOS METAIS	20
2.6.1	Material Cerâmico Aspecto Geral	20
2.6.2	Propriedades Elásticas	21
2.6.3	Resistência Mecânica	21
2.6.4	Dureza	22
2.6.5	Tenacidade	22
2.6.6	Condutividade Térmica	23
2.6.7	Materiais Cerâmicos Ferramentas de Corte	23
2.6.8	Ferramentas a Base de Óxido de Alumínio	24
2.6.9	Ferramentas a Base de Nitreto de Silício (SiN)	24

2.6.10	Uso das Ferramentas Cerâmicas	24
2.6.10.1	Geometria de Corte	25
2.6.10.2	CONDIÇÕES DE CORTE	25
2.6.11	Aplicação	28
2.7	USO DO NITRETO DE BORO CÚBICO (CBN) NA USINAGEM DOS METAIS	29
2.7.1	Propriedades CBN	29
2.7.2	Aplicação do CBN na Usinagem dos Metais	30
<b>CAP. 3</b>	<b>INTEGRIDADE DE SUPERFÍCIE E SUBSUPERFÍCIE</b>	<b>31</b>
3.1	Alterações de Superfície	34
3.1.1	As principais causas das alterações de superfícies produzidas pelos processos de usinagem são	36
3.1.2	Alterações de superfície produzidas por operações convencionais de usinagem	36
3.2	Efeitos de Superfície na Retificação	37
3.3	Tensões residuais na camada superficial	41
3.4	Efeitos de propriedades mecânicas	41
3.5	Resistência à fadiga	42
3.6	Efeitos da retificação	43
3.7	Medição e efeitos da integridade de superfície	44
3.7.1	Exame macroscópico	45
<b>CAP. 4</b>	<b>TENSÕES RESIDUAIS SUPERFICIAIS E SUBSUPERFICIAIS</b>	<b>46</b>
4.1	Efeitos das Tensões residuais Superficiais e Subsuperficiais	48
4.2	Princípios Básicos do Método de Medir Tensões Residuais pela difração de raios-x	52
4.2.1	Fenômenos de difusão de raio-x (56)	53
4.2.2	Métodos mais utilizados	61
4.2.2.1	Método convencional	61
4.2.2.2	Método de Inclinação Lateral (método de Schulz)	65
4.2.2.3	Método da Oscilação do ângulo incidente de raios-x	66
4.2.2.4	Método do $\psi$ fixo	70
4.2.2.5	Exemplo de medida	72

<b>CAP. 5</b>	<b>EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E METODOLOGIA</b>	<b>73</b>
5.1	Equipamentos	73
5.2	Materias	73
5.2.1	Utilizados na operação de torneamento na forma de acabamento	73
5.2.2	Utilizados na operação de retificação na forma de acabamento	74
5.2.3	Ataque químico	74
5.2.4	Corpo de prova	74
5.2.4.1	Composição química do corpo de prova	75
5.3	Metodologia do experimento	77
5.3.1	Preparação dos corpos de prova	78
5.3.1.1	Corte, pré usinagem e tratamento térmico	78
5.3.1.2	Condições de usinagem	79
5.3.1.3	Medidas Realizadas	79
<b>CAP. 6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>83</b>
<b>CAP. 7</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>92</b>
<b>CAP. 8</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>93</b>
<b>CAP. 9</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>94</b>
<b>10</b>	<b>ANEXO A</b>	<b>98</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura		
2.1	Linha de pesquisas em retificação e seus objetivos .....	4
2.2	Operações de retificação segundo DIN 8589 .....	7
2.3	Quatro exemplos de diâmetros equivalente .....	8
2.4	Espessura de corte equivalente .....	10
2.5	Dureza de Knoop de diversos abrasivos .....	12
2.6.1	Execução de pré chanfro para evitar quebra prematuras da aresta de corte	26
2.6.2	Término da operação de faceamento antes de corrigir o furo .....	27
2.6.3	Término da operação de torneamento antes da saída da ferramenta .....	27
2.7.1	Variação da dureza com a temperatura para diferentes materiais e ferramentas .....	30
3.1	Esquema de rugosidade e ondulação sobre uma superfície com posicionamento indirecional e uma falha .....	31
3.2 a,b,c,d,e	Características superficiais produzidas através de retificação suave e abusiva de aço ABNT 4340 .....	40
3.3	Tensão residual a partir de retificação do aço D5AC com dureza de 56 Rc	41
3.4	Baixa resistência fadiga a partir de retífica abusiva do aço 4340 (têmpera e revenido com dureza de 50 HRC). testes de fadiga .....	43
4.1	Esquema mostrando as três ordens de tensão (tensões residuais I, II e III e a superposição das mesmas em vários grãos) .....	47
4.1.1	Condição de difração de raios-x .....	54
4.2	Estrutura cristalina .....	54
4.3	Perfis de medição de aço inoxidável .....	57
4.4	Perfis de medição de latão .....	58
4.5	Perfis de medição de alumínio .....	59
4.6	Fotografia de um Pico que aparece nos perfis da amostra mostrados nas figuras anteriores (4.3, 4.4 e 4.5) .....	60
4.7	ISO - Inclination Method (Método comum) .....	62
4.8	Método da inclinação lateral. (Side Inclination Method) .....	63

4.8c	Exemplo de medida de tensão residual superficial . . . . .	63
4.8d	Exemplo de resultado de tensão residual usando o equipamento Strainflex da Rigaku. Área irradiada diâmetro 8 mm. Radiação Cr-K $\alpha$ . Plano de difração: (211) Fe . . . . .	64
4.9	Mostra a variação angular $2\theta$ versus $\text{Sen}^2\psi$ . . . . .	65
4.10	Foto dos anéis de coleção de Debeye . . . . .	67
4.11	Dados de Oscilação . . . . .	68
4.12	Método do ângulo $\psi$ fixo . . . . .	70
4.13	Medição de materiais que possuem textura . . . . .	70
4.14	Medição de materiais que possuem cristais brutos . . . . .	70
5.1	Corpo de Prova . . . . .	75
5.2	Aço ABNT 52100 recozido (ampliado 800 vezes) . . . . .	76
5.3	Aço ABNT 52100 temperado e revenido (ampliado 800 vezes) . . . . .	76
5.4	Visão geral do experimento . . . . .	77
5.5	Posicionamento para medidas com raios-x na direção tangencial . . . . .	82
6.1	Valores médios de tensões residuais, em Mpa, superficiais e subsuperficiais em função da dureza em RC (antes da usinagem) . . . . .	83
6.2	Valores médios de tensões residuais superficiais e subsuperficiais após retificação em MPa . . . . .	84
6.3	Valores médios de tensões residuais superficiais e subsuperficiais após torneamento em MPa . . . . .	85
6.4	Gradiente de dureza no sentido radial . . . . .	88

## LISTA DE TABELAS

### Tabela

2.1	Afinidade química dos abrasivos .....	12
3.1	Baixa tensão em procedimento de retificação .....	38
3.2	Efeito de método de usinagem sobre a resistência à fadiga .....	42
4.1	Principais características dos métodos disponíveis para medida de tensões residuais .....	50
5.1	Valores médios de tensões residuais, em Mpa, superficiais e subsuperficiais em função da dureza em RC (antes da usinagem) .....	78
6.1	Valores médios de tensões residuais, em Mpa, superficiais e subsuperficiais em função da dureza em RC (antes da usinagem) .....	83
6.2	Valores médios de tensões residuais superficiais e subsuperficiais após retificação em MPa .....	84
6.3	Valores médios de tensões residuais superficiais e subsuperficiais após torneamento em MPa .....	85
6.4	Valores médios de tensões residuais em MPa para operação de retificação .....	86
6.5	Valores médios de tensões residuais em MPa para operação de torneamento .....	86
6.6	Valores de tensões residuais de superfície e subsuperfície .....	87

## NOTAÇÃO

$a$	mm	Profundidade de penetração do rebolo
$b$	mm	Largura de corte
$D_e$	mm	Diâmetro equivalente
$D_s$	mm	Diâmetro do rebolo
$D_w$	mm	Diâmetro da peça
$Z$	$\text{mm}^3/\text{s}$	Volume de cavaco removido por unidade de tempo = $Zw$
$Z'$	$\text{mm}^3/\text{s} \times \text{mm}$	Taxa de remoção de cavaco = $Z'w$
$Zw$	$\text{mm}^3/\text{s}$	Volume de cavaco removido por unidade de tempo
$Z'w$	$\text{mm}^3/\text{s} \times \text{mm}$	Taxa de remoção de Cavaco $Z'w = \frac{Zw}{b}$
$V_c$	m/min	Velocidade de corte
$V_f$	m/s	Velocidade de mergulho
$V_w$	m/s	Velocidade periférica da peça
$V_s$	m/s	Velocidade periférica do rebolo
$f$	mm/volta	Avanço
$A_p$	mm	Profundidade de corte
$E$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Módulo de elasticidade
$G$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Módulo de cisalhamento
$\nu$	adimensional	Coefficiente de Poisson
$RC$	$\text{Kg}/\text{mm}^2$	Dureza Rockwell
$\chi$	grau	Ângulo de Posição
$\theta$	grau	Ângulo de Willian Bragg
$K$	MPa	Constante de Tensão
$\psi$	grau	Ângulo entre o feixe incidente e a normal aos planos cristalinos que difratam
$\psi_0$	grau	Ângulo entre o feixe incidente e a normal ( $N'$ ) à superfície da amostra
$\sigma$	MPa	Medida da tensão residual superficial
$n$	0,1,2,3 ...	Número inteiro arbitrário - indica a ordem da ocorrência da difração
$\lambda$	Å	Comprimento de onda de raio-X
$d$	Å	Espaçamento interplanar da estrutura cristalina
$T$	s	Constante de tempo
$\tau$	s	Ciclo de oscilação
ECM	-	Usinagem eletroquímica
ELP	-	Eletropolimento
CM	-	Usinagem Química

## 1 - INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, o interesse pela melhoria da qualidade e desempenho do produto proporciona uma motivação a mais para a indústria e maiores investimentos em pesquisas tecnológicas. A Universidade, que tem a pesquisa como um de seus principais papéis, aparece como uma aliada cada vez mais interessante da indústria. Da soma de interesses e insumos, o potencial para solução de problemas característicos de Pesquisas e Desenvolvimento aumenta significativamente. É dentro deste contexto, é que identificamos os aliados industriais para a realização deste trabalho, entre os quais podemos citar: VILLARES S/A, EQUIPAMENTOS CLARK LTDA., DIFER DIAMANTES INDUSTRIAIS LTDA., WINTER DO BRASIL FERRAMENTAS DIAMANTADAS, BORNITRID LTDA. E KRUPP METALÚRGICA CAMPO LIMPO LTDA.

De maneira específica, em termos de usinagem, notamos um grande interesse em descobrir meios que proporcionem uma otimização do processo produtivo. Em função disso, é necessário criar situações que favoreçam o desempenho da trilogia produto, fabricação e uso. Portanto, é necessário que se faça uso de equipamentos, materiais e ferramentais adequados, visando melhores qualidades da integridade superficial.

O objetivo deste trabalho é estudar por comparação o comportamento das tensões residuais superficiais em aço endurecido, ABNT 52100, submetido ao forneamento e a retificação na forma de acabamento.

Através desse procedimento, além de analisarmos o comportamento das tensões residuais superficiais, foi verificada a viabilidade do ponto de vista estritamente técnico, a substituição de operações de retificação na forma de acabamento pelas de torneamento.

Já é de conhecimento que as tensões residuais superficiais são de importância fundamental no comportamento da resistência à fadiga dos materiais. De maneira unânime a literatura específica relata que as tensões residuais, quando compressivas, são benéficas, ou seja, melhoram a resistência à fadiga do material. Enquanto que as trativas, dependendo da sua magnitude, são maléficas, ou seja, contribuem para declínio da resistência à fadiga do material.

No capítulo 2, são abordadas de maneira sucinta as características dos processos de retificação e torneamento.

Em seqüência, no capítulo 3, são relatados alguns aspectos relativos à integridade de superfície, enquanto que, capítulo 4, a abordagem está em função da conceituação das tensões residuais superficiais, objetivos e métodos para medi-las.

Já no capítulo 5 são relatados os equipamentos, materiais e metodologia de trabalho.

Finalizando, tem-se nos capítulos 6 e 7 a apresentação dos resultados e discussões e as conclusões finais, respectivamente.

## 2 - CARACTERÍSTICAS TEÓRICA DOS PROCESSOS DE RETIFICAÇÃO E TORNEAMENTO.

Antes de abordarmos as características de retificação, não podemos deixar sem mencionar os seus objetivos, que não deixam de ser análogos aos demais processos de fabricação, ou sejam:

- Aumentar a qualidade do produto (formas dimensão e acabamento superficial);
- Aumentar a produtividade dos processos atuais (não esquecendo-se do fator essencial que é a qualidade);
- Viabilizar e tornar previsível o processo em função dos objetivos da automação (nos dias atuais, o uso de máquinas CN, CNC é cada vez maior e bancos de dados tecnológicos para sistemas CAM e CIM);
- Desenvolver novos processos, cuja finalidade é tornar possível a retificação de peças mais complexas e materiais de difícil retificabilidade;
- Desenvolvimento de novos equipamentos (máquinas retificadoras);

Tais objetivos de maneira geral são estudados por assuntos, em linhas de pesquisas, a partir da característica de cada pesquisador e da instituição em que trabalha, conforme ilustrado na Fig. 2.1.

OBJETIVOS				
LINHAS DE PESQUISA	Aumentar a qualidade do produto	Aumentar a produtividade do processo	Tornar o processo previsível	Desenvolver novos processos/operações
Ferramentas de retificação	X	X		X
O ciclo de retificação		X		
A estabilidade dinâmica do processo	X	X	X	X
A geometria de corte e o micro-fenômeno de usinagem			X	
Problemas térmicos	X	X	X	X
Retificação de alta velocidade.	X	X	X	X
Afinção de rebolos	X	X	X	X
O processo de geração de forças (modelos)	X	X	X	
Equipamentos e máquinas para retificação	X	X	X	X

Fig. 2.1 - Linha de pesquisas em retificação e seus objetivos.(16)



Neste item serão abordadas considerações teóricas em função de alguns itens citados na fig. 2.1 com o simples objetivo de esclarecimentos.

## **2.1- As operações de retificação e suas características geométricas**

No estudo da remoção de material no processo de retificação, requer-se o conhecimento de algumas características geométricas da operação. Na atualidade, muitos dados sobre retificação já foram constatados, mas a transferência dos mesmos para diferentes operações é difícil (1). Uma solução viável para este problema, está nos parâmetros equivalentes que inter-relaciona os vários tipos de retificação. Estes parâmetros serão definidos, mas antes é oportuno mencionar a classificação das operações de retificação, ou seja:-

As operações de retificação são organizadas e classificadas de maneira diversa pelos autores tradicionais que estudam as máquinas ferramentas e os processos de fabricação (Rossi, Micheletti, Veck, Doyle, Morris, König, Kronenberg e demais). A tendência desses autores na forma de classificar o processo de retificação é análoga à de norma ISO que subdivide o processo em:- retificação cilíndrica, plana e de forma, sendo que retificação de forma é ainda subdividida em retificação por geração, de perfis, de rosca e cilíndrica de forma.

A classificação da norma ISO assim como das demais, é orientada pela forma da superfície usinada e o processo de retificação em si não é levado em consideração (1). O uso de critérios baseados no processo, para a distinção das diferentes operações seria a melhor forma de classificar as operações de retificação. Por exemplo: a forma do perfil ativo do rebolo (retificação periférica ou de face); a direção do movimento principal de avanço (retificação radial, axial, tangencial ou oblíqua); o processo de corte contínuo ou descontínuo e o sistema de fixação da peça (sem furos de centros, entre pontas, pinças, placa, etc).

Todos estes são parâmetros que caracterizam mais objetivamente a geometria de corte. Desta maneira, operações novas ou complexas podem ser classificadas e otimizadas, com os dados obtidos de outros estudos, melhorando-se a aplicabilidade das pesquisas já ocorridas.

A classificação que melhor se adapta a essa maneira de pensar, é a da DIN 8589, que subdivide as operações em:- tangencial de mergulho, tangencial de passagem lateral (ou de face), de mergulho e lateral de passagem. A forma geométrica das superfícies obtidas é dividida em: cilíndricas externas, cilíndricas internas, planas e rotativas. A figura 2.2 mostra os esquemas (DIN 8589) das operações onde se observa a nomenclatura utilizada na geometria de corte. A parte inferior da figura mostra expressões para o cálculo da taxa de remoção de material Z e a taxa específica de remoção de material Z' (taxa de remoção por unidade de largura de rebolo (2).

Mesmo sendo a melhor classificação, a DIN 8589 não considera o tipo de fixação da peça, ficando a operação sem centros, ainda um caso à parte nas pesquisas em retificação. Outras operações de forma, ou especiais, também continuam como casos particulares (ex. retífica de cames, de roscas, de forma, etc).

Com a classificação geométrica das operações já definida e dentro da filosofia de utilizar resultados de pesquisa em retificação de maneira mais genérica, alguns parâmetros equivalentes que vêm sendo amplamente utilizados podem ser definidos. Estes são: o diâmetro equivalente e a espessura de cavaco equivalente.

### 2.1.1 - O diâmetro equivalente ou conformidade (De)

É um parâmetro criado por Hahn (3) que representa o grau com que a superfície de rebolo (no caso da retificação tangencial) e a peça se adaptam ou se conformam. Pode-se dizer também que o diâmetro equivalente é aquele que o rebolo deve ter para proporcionar mesma geometria de corte da operação tangencial.

O diâmetro equivalente é dado por:-

$$De = \frac{Ds}{1 \pm (Ds/Dw)} \quad (\text{mm}) \quad (2.1)$$

onde o sinal positivo representa, a operação cilíndrica externa e o negativo a interna e Dw é o diâmetro da Peça, enquanto que Ds é o diâmetro do rebolo .

A fig. 2.3 mostra quatro exemplos de diâmetros equivalentes, onde se pode entender com maior nitidez o significado físico deste parâmetro.

	Cilíndrica Externa	Cilíndrica Interna	Plana	Rotativa
Tangencial de mergulho				
Tangencial de passagem				
Lateral de mergulho				
Lateral de passagem				

	Cilíndrica externa	Cilíndrica interna	Plana	Rotativa
Tangencial de mergulho	$Z \cdot \pi \cdot d_w \cdot v_f \cdot b_s$ $Z \cdot \pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot n_w \cdot b_s$ $Z' \cdot \pi \cdot d_w \cdot v_f$ $Z' \cdot \pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot n_w$	$Z \cdot \pi \cdot d_w \cdot v_f \cdot b_s$ $Z \cdot \pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot n_w \cdot b_s$ $Z' \cdot \pi \cdot d_w \cdot v_f$ $Z' \cdot \pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot n_w$	$Z \cdot a_e \cdot a_p \cdot v_w$ $Z' \cdot a_e \cdot a_p \cdot v_w \cdot \frac{1}{b_k}$ $Z' \cdot a_e \cdot v_w$	$Z \cdot a_e \cdot v_w \cdot a_p$ $Z \cdot \pi \cdot a_e \cdot d_{wm} \cdot n_w$ $Z' \cdot a_e \cdot v_w \cdot a_p \cdot \frac{1}{b_k}$ $Z' \cdot \pi \cdot a_e \cdot d_{wm} \cdot n_w \cdot \frac{1}{b_k}$
Tangencial de passagem	$Z \cdot \pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot v_n$ $Z \cdot \pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot a_p \cdot n_w$ $[Z' \cdot \pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot v_n \cdot \frac{1}{b_k}]$ $[Z' \cdot \pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot a_p \cdot n_w \cdot \frac{1}{b_k}]$	$Z \cdot \pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot v_n$ $Z \cdot \pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot a_p \cdot n_w$ $[Z' \cdot \pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot v_n \cdot \frac{1}{b_k}]$ $[Z' \cdot \pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot a_p \cdot n_w \cdot \frac{1}{b_k}]$	$Z \cdot a_e \cdot a_p \cdot v_w$ $[Z' \cdot a_e \cdot a_p \cdot v_w \cdot \frac{1}{b_k}]$	$Z \cdot \pi \cdot a_e \cdot v_f \cdot d_{wm}$ $[Z' \cdot \pi \cdot a_e \cdot v_f \cdot d_{wm} \cdot \frac{1}{b_k}]$
Lateral de mergulho	$Z \cdot \pi \cdot d_w \cdot v_f \cdot b_k$ $Z \cdot \pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot n_w \cdot b_k$ $[Z' \cdot \pi \cdot d_w \cdot v_f]$ $[Z' \cdot \pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot n_w]$		$Z \cdot a_e \cdot v_f \cdot b_w$ $[Z' \cdot a_e \cdot v_f \cdot b_w \cdot \frac{1}{b_k}]$	$Z \cdot a_e \cdot v_w \cdot a_p$ $Z \cdot \pi \cdot a_p \cdot d_{wm} \cdot n_w$ $[Z' \cdot a_e \cdot v_w \cdot a_p \cdot \frac{1}{b_k}]$ $[Z' \cdot \pi \cdot a_p \cdot d_{wm} \cdot n_w \cdot \frac{1}{b_k}]$
Lateral de passagem	$Z \cdot \pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot v_n$ $Z \cdot \pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot a_p \cdot n_w$ $[Z' \cdot \pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot v_n \cdot \frac{1}{b_k}]$ $[Z' \cdot \pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot a_p \cdot n_w \cdot \frac{1}{b_k}]$		$Z \cdot a_e \cdot a_p \cdot v_w$ $[Z' \cdot a_e \cdot v_w]$	$Z \cdot \pi \cdot a_e \cdot v_f \cdot d_{wm}$ $[Z' \cdot \pi \cdot a_e \cdot v_f \cdot d_{wm} \cdot \frac{1}{b_k}]$

Figura 2.2 - Operações de retificação segundo DIN 8589.(16)

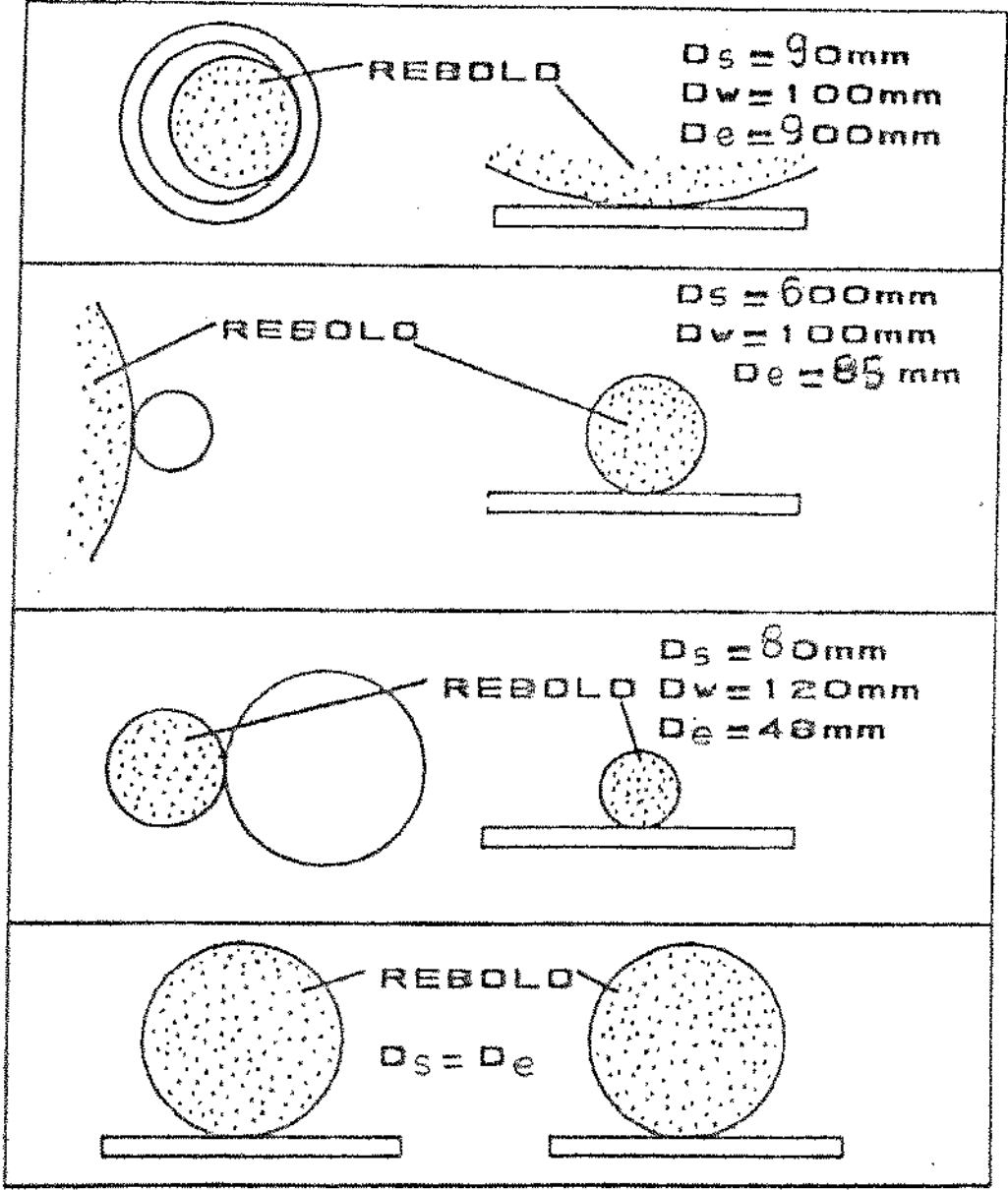


Figura 2.3 - Quatro exemplos de diâmetro equivalente. (16)

O diâmetro equivalente é, portanto um parâmetro que interrelaciona a operação tangencial plana com a cilíndrica tangencial externa e a cilíndrica tangencial interna para qualquer diâmetro de rebolo e de peça. Atualmente os autores que estudam cinemática de corte utilizam muito o parâmetro  $D_e$  nos seus equacionamentos.

É interessante observar que para as operações de face e tangenciais de perfis, onde as velocidades envolvidas são variáveis ao longo da superfície de trabalho, o parâmetro  $D_e$  não é utilizado. Os pesquisadores, neste caso, utilizam outro tipo de análise onde é calculada, para cada ponto, a conformidade e a velocidade de corte.

### 2.1.2 - Espessura de corte equivalente.

É uma grandeza muito usada como variável independente e que descreve a condição de corte é o parâmetro  $Z'w$ : quantidade de cavaco removido por unidade de tempo e unidade de largura de corte (4), expressa pelo relacionamento.

$$Z'w = \frac{Z_w}{b} = \pi D_w \cdot V_f = a \cdot V_w \quad (2.2)$$

J.Peters (5), partindo de estudos de diversos autores, propôs um parâmetro muito importante para avaliação do processo, a espessura de corte equivalente  $heq$  que pode ser definida como a relação entre a taxa de remoção e a velocidade de corte (ou aproximadamente, a velocidade periférica de rebolo):-

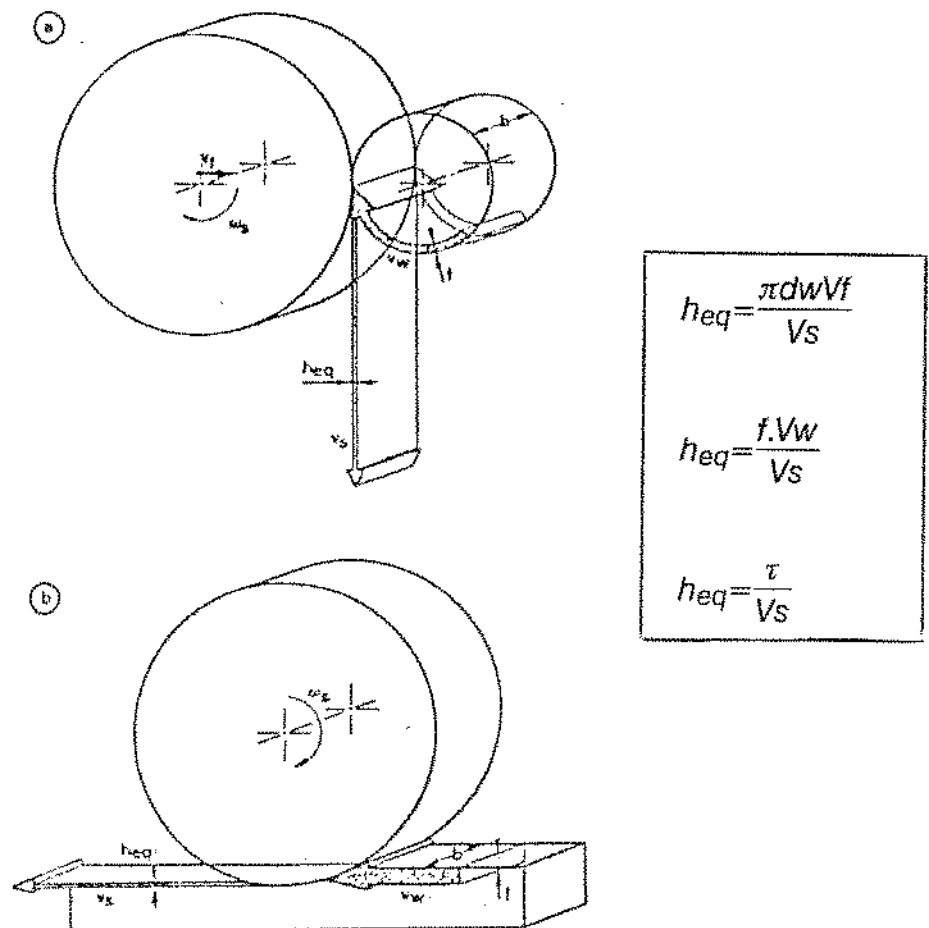
$$heq = \frac{\pi D_w V_f}{V_s} = \frac{a V_w}{V_s} = \frac{Z_w}{V_s} \quad (2.3)$$

A espessura equivalente representa, portanto, a espessura da camada de material que é arrancada pelo rebolo, com a velocidade periférica deste, e cujo volume específico equivale àquele retirado da peça no tempo.

$$V_s \cdot heq = V_w \cdot a \quad (2.4)$$

A fig 2.4 ilustra o conceito de espessura de corte equivalente. É importante salientar que o  $heq$  tem sido muito usado como um dos parâmetro na avaliação dos

resultados de retificação e que a força de retificação, como parâmetro de saída do processo é potencialmente dependente do  $h_{eq}$ .



**Fig. 2.4 - A espessura de corte equivalente.(16)**

No item 2.3 será feita uma análise a respeito da espessura de corte equivalente e do diâmetro equivalente, no fenômeno de usinagem. Antecipadamente, pode observar que o Diâmetro equivalente ( $D_e$ ) determina o comprimento de contato entre rebolo e peça-trabalho e que este caracteriza, para um certo tipo de rebolo, o número de grãos que estão na região de corte (um dado importante para o estudo do micro-fenômeno).

A espessura de corte equivalente, por sua vez, é entendida como aquela espessura de material que tais grãos devem cortar.

## **2.2 - A ferramenta utilizada no Processo de Retificação.**

Como elemento efetivamente atuante durante a retificação, o rebolo tem recebido muita atenção por parte dos pesquisadores e mesmo de seus fabricantes, que acreditam que a otimização da ferramenta pode trazer grandes vantagens para o processo. Por outro lado, em termos de produção, qualidade e capacidade de cortar materiais duros, pode-se afirmar que o rebolo é um dos elementos que mais limita o processo de retificação (6).

Esforços tem sido feitos com objetivo de se aumentar, por exemplo, a rotação limite de ruptura do rebolo (7) ou melhorar sua capacidade de usinar materiais muito duro (7, 8). Não se pode esquecer também as grandes vantagens que se pode obter com a diminuição do desgaste do rebolo, sem a perda de sua capacidade de corte. Muitas pesquisas tem tomado essa direção (9, 10, 11).

A preocupação com a ferramenta abrasiva chega até ao ponto onde se estuda o significado prático da deflexão de contato do grão abrasivo, como um parâmetro limitante de qualidades geométricas e dimensionais. Salni (13), em 1982, desenvolveu uma teoria sobre tipos de deflexões, de contato do grão e concluiu, com auxílios de ensaios, que deflexão do grão abrasivo melhora a rugosidade superficial do produto, mas limita a profundidade mínima de corte, trazendo problemas de exatidão dimensional. Muitos são os trabalhos de pesquisa que têm como objetivo principal o rebolo e suas características Físico-Químicas, porém, a aplicabilidade de prática destes resultados tem sido muito pequenas (14). A escolha do rebolo adequado para o binômio "material-operação de retificação", em situações de produção, é feita freqüentemente por tentativas que dispendem habilidade e tempo.

### **2.2.1 - O material abrasivo**

Leichter (15) apresenta critérios para a escolha do grão abrasivo mais adequada para um dado material a ser retificado com o desenvolvimento de novos abrasivos como o diamante sintético, o nitreto de boro cúbico cristalino e também com o aumento das velocidades periféricas dos rebolos. O que foi possível exclusivamente através de ligas adequadas. A escolha do abrasivo passou a ter novos fatores

determinantes. Leichter apresenta, como um de seu critérios de escolha, a afinidade química entre o grão e o material da peça-trabalho. A tabela 2.1 apresenta a afinidade química que diversos materiais têm com os principais abrasivos (óxido de alumínio, carboneto de silício, nitreto de boro e diamante) além da temperatura limite de estabilidade estrutural de cada um.

ABRASIVO	ESTABILIDADE TÉRMICA ATÉ: °C	AFINIDADE QUÍMICA COM	ADEQUADO PARA
Óxido de Alumínio	2000	Óxidos Vidros Cerâmicas Rochas	aços de todas as qualida- des
Nitreto de Boro Cúbico (CBN)	1370		
Carboneto de Silício	1300	Materiais que assi- milam car- bono.	Aços com carbono saturado, ferro fun- dido, óxi- dos, (ví- dro, cera- mica, etc.)
Diamante	900	Ex.: aço baixo car- bono	

Tabela 2.1 - Afinidade Química dos abrasivos. (10)

A figura 2.5 mostra a dureza dos mesmos abrasivos segundo o método de Knoop (15)

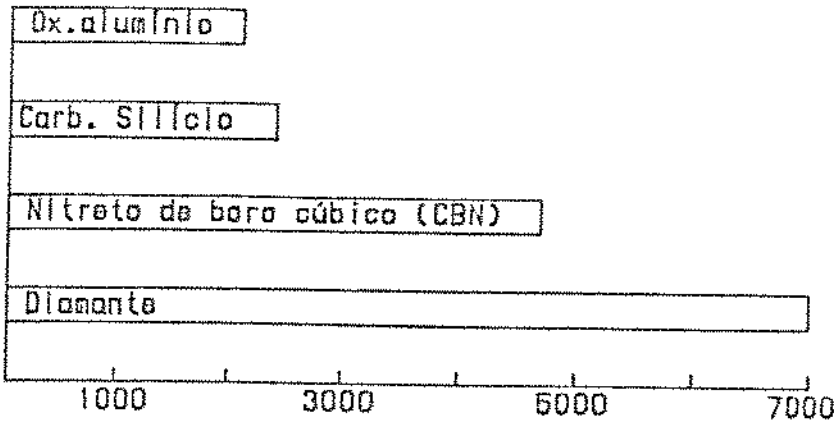


Fig. 2.5 - Dureza de Knoop de diversos abrasivos (kgf/mm<sup>2</sup>) (15)



É interessante observar que cada tipo de abrasivo apresenta vantagens e desvantagens. Por exemplo: o óxido de alumínio, apesar de ser abrasivo menos duro, tem grande estabilidade química e resiste à alta temperatura, enquanto o diamante, que é o mais duro, apresenta baixa resistência a temperatura. Isto faz com que cada tipo de abrasivo tenha uma aplicação adequada para um certo grupo de materiais e condições de retificação a saber:

- Óxido de alumínio :- aços macios até ligados,  
retificação a alta velocidade e  
retífica seco.
- Nitreto de Boro:- aços rápidos,  
aços temperados (até 60 HRc)
- Carbureto de Silício:- aços inoxidáveis (fluído),  
ferro fundido cinzento e  
materiais não metálicos.
- Diamante:- materiais cerâmicos,  
vidro, fofo cinzento,  
metais duros e ligas  
metálica aplicadas  
por pulverização.

Com os dados apresentados pode-se observar a grande potencialidade do nitreto de boro cúbico pelo fato de ser, simultaneamente, muito duro e muito resistente à temperatura. É sem dúvida, um grande candidato à retificação a alta velocidade de aços muito duros. Apesar disso, não se descarta a utilização do diamante na usinagem de vidros, rochas e materiais cerâmicos, com os quais o nitreto de boro tem afinidade química e perde a afiação facilmente.

Assim como alguns critérios para a escolha de tipo de abrasivo são estabelecidas, as outras variáveis como o tamanho dos grãos, tipo de liga, estrutura e dureza, também obedece critérios que determinam a sua utilização. Estes critérios, afirma Leichter, ainda não são muito conhecidos e o problema aumenta quando se analisa as seguintes possíveis variáveis:

- \* cerca de 20 diferentes tipos de abrasivos;
- \* cerca de 28 tamanhos de grãos;
- \* cerca de 15 durezas;
- \* cerca de 8 estruturas;
- \* cerca de 20 variantes de liga;

Portanto, tem-se, teoricamente, acima de um milhão de possibilidades. O autor conclui que este é um ramo de estudo (escolha do tipo de rebolo ideal) que merece pesquisa, desenvolvimento e principalmente a catalogação de resultados e experiência prática.

### **2.2.2 - Desgaste do Rebolo e Agressividade**

O desgaste da ferramenta abrasiva é um aspecto muito estudado. Inicialmente pode-se fazer distinção entre desgaste e perda de afiação (ou agressividade) do rebolo. O desgaste e a quantidade de rebolo consumido durante um determinado ciclo ou operação, enquanto a perda de afiação (ou agressividade) é decorrente do arredondamento das arestas cortantes ou do entupimento das porosidades com cavacos (empastamento). É interessante observar que um rebolo pode sofrer desgaste sem perder agressividade (e vice-versa,) o que é muito comum. (16)

### **2.3 - A caracterização Topográfica de Rebolos.**

O estudo e a caracterização topográfica dos rebolos é um assunto que tem recebido grande atenção por parte dos pesquisadores de toda parte. Métodos e parâmetros para se avaliar topografia de rebolos estão sendo criados cada vez mais e

hoje alguns deles já podem ser utilizados na prática, para avaliação do desempenho de ferramentas abrasivas. Uma rápida visão sobre tais parâmetros e métodos é apresentada a seguir:

### **2.3.1 - Parâmetros e método para caracterização topográfica.**

Numa operação de retificação o microfenômeno de usinagem pode ser determinado, fundamentalmente, através de 5 fatores:

- a) As características físicas da peça trabalho;
- b) As características físicas/geométricas da operação;
- c) As características físicas do rebolo;
- d) As características topográficas do rebolo;
- e) As condições de interação entre as superfícies (lubrificação, refrigeração e outros).

As características físicas do rebolo especificadas pelo código padronizado são: tipo de abrasivo, tipo de liga, granulometria do abrasivo, dureza, estrutura, modificação de liga, etc. Todos esses parâmetros não determinam, por si só, as condições topográficas em que se encontra a ferramenta abrasiva. Outros fatores, tais como as condições de dressagem, forma do dressador e condições de utilização do rebolo, são responsáveis pela transformação topográfica da ferramenta.

É importante então, que se conheça de alguma forma, a topografia da ferramenta com a qual se trabalha, para que seja possível estudar a cinemática e a dinâmica do corte, respondendo-se assim perguntas como: Qual a rugosidade que terá a peça acabada? Qual o desgaste do rebolo numa certa operação? Quantos grãos estão cortando efetivamente o material? Qual será a força de corte? e outras (16).

## **2.4 - Forças de Corte na Retificação**

Como nos outros processos de fabricação o estudo das forças de usinagem na retificação é um tópico de extrema importância. Na área de projeto, no dimensionamento de retificadoras, as forças de corte são parâmetros que determinam tanto a potência motriz do rebolo, como as necessidades estruturais da máquina. Assim,

através de métodos numéricos, pode ser calculada a rigidez da estrutura e, com as forças de corte, podem ser previstas as deformações sofridas. Já na área do processo, as forças de corte causam influências na qualidade dimensional e geométrica do produto acabado, na rugosidade, no desgaste do rebolo e também no tempo de retificação.

Portanto, é importante que tais forças possam ser previstas (antecipadamente), pois propiciam os dados necessários, tanto no projeto das máquinas, como no conhecimento do processo como um todo, com o objetivo de otimização e até mesmo automação.

A determinação da força de retificação, apesar de sua importância, ainda é pouco conhecida quando comparada a outros processos. Ela depende de um enorme conjunto de fatores (tipos de rebolos, condições de corte, condições de afiação, fluídos, etc), e está sujeita a grandes variações com as modificações de cada um deles.

De forma geral os pesquisadores consideram a superfície do rebolo homogênea na largura( $b$ ) e, portanto, a força de corte proporcional a esta. A força específica de corte  $F' = F/b$  é um parâmetro que tem sido amplamente usado em pesquisas sobre o processo.  $F'$  será utilizado como caracterização das forças de corte (16).

Existem outras influências nas operações de retificação e as quais não são o objetivo fundamental deste trabalho, mas poderão ser estudadas (16).

## **2.5 - CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS DE TORNEAMENTO**

O processo de retificação tem, ao longo de toda a sua história, destinado, principalmente, a usinagem de materiais (por ex. aços no estado endurecido).

O torneamento, o fresamento e a furação são pouco utilizados em tais aplicações. O motivo disso com certeza estava na ausência de máquinas e ferramentas adequadas e compatíveis. Entretanto, devido aos recentes desenvolvimentos na área de materiais e máquinas ferramentas, tais processos começam a se despontar como alternativa para a substituição da retificação.

O processo de torneamento de aços endurecidos apresenta algumas características bem distintas do torneamento de um aço dúctil. Fundamentando-se nos

trabalhos de König, W., et alli (17), e Nakayama K., et alli (18) podemos estudá-los da seguinte maneira:-

- \* propriedade do material da peça;
- \* parâmetros de corte requeridos;
- \* formação do cavaco;
- \* rugosidade superficial;
- \* integridade superficial;
- \* forças de usinagem;

#### **2.5.1 - Propriedades do Material da peça.**

A alta dureza à penetração que o aço endurecido oferece seque as ferramentas de corte com dureza mais alta. Normalmente essas ferramentas possuem dureza três vezes maior que o material em questão. Isto causa um forte impacto e um alto tensionamento sobre a pequena área de contato ferramenta-peça.

Em função de sua alta abrasividade, o aço endurecido exige ferramentas com alta resistência contra o desgaste por abrasão. Enquanto que sua baixa ductibilidade ocasiona o aparecimento de cavaco e forma de dente de serra.

E, finalmente, podemos constatar o alto valor da taxa (Dureza / Módulo E), o qual produz um valor apreciável de recuperação elástica, após a passagem da aresta de corte. O erro dimensional, devido a esse fato, torna-se sério e operações de acabamento.

#### **2.5.2 - Parâmetros de corte requerido.**

Para minimizar o desgaste da ferramenta e o erro dimensional frequente, pequenos valores de profundidade de corte e avanço são utilizados. Grandes raios de ponta também são selecionados. Como resultado, a espessura do cavaco não deformado é muito fina.

Para a prevenção da fragmentação da aresta de corte, torna-se necessário o uso do ângulo de saída negativo e da aresta de corte chanfrada. Como o cavaco não deformado é muito fino, o corte real acontece, na maioria dos casos, sobre o chanfro. Posteriormente, a abrasividade do material danifica a aresta de corte rapidamente tornando o ângulo real de saída mais negativo.

Nos trabalhos mencionados anteriormente (17) e (18), os valores, de velocidade de corte, avanço e profundidade são modestos, principalmente a velocidade de corte, ou seja:-

Velocidade de corte ( $V_c$ ): 60 a 100 m/min

Avanço  $f$  : 0,08 a 0,10 mm/volta

Profundidade de corte  $A_p$ : 0,3 a 0,4 mm

### **2.5.3 - Formação de Cavaco**

Devido ao ângulo de saída negativo, aparecem tanto na ferramenta como no material da peça, grandes tensões de compressão. Conseqüentemente, o material é separado por trincas e plastificação, formando-se então os cavacos. Em função da fragilidade do material, a alta tensão de compressão, inicialmente, não conduz à deformação plástica mas sim a formação de trincas. Essas trincas liberam a energia armazenada, agindo como uma superfície deslizante para o segmento do material, forçando-o entre as superfícies da peça e da ferramenta.

Ao mesmo tempo, deformação plástica e aquecimento ocorrem na peça e na ferramenta. Após o deslizamento do segmento de cavaco, a pressão de corte resulta na formação de uma nova trinca e um novo segmento de cavaco. O cavaco assim formado é denominado "cavaco em forma de dente de serra", devido a forma de sua seção transversal.

### **2.5.4 - Rugosidade Superficial**

Na usinagem de aços endurecidos, a formação de aresta postiça dificilmente ocorre, em função da baixa ductibilidade dos mesmos e da alta temperatura de corte.

Como resultado, a aresta de corte é transferida à superfície usinada com precisão razoável. Desta maneira, contanto que o desgaste da superfície de folga seja pequeno e uniforme, ele não aumentará a rugosidade superficial. Com o progresso do desgaste, a aresta de corte tende a um certo engrossamento, ou seja, perde a sua eficiência, causando, então, a deterioração da superfície.

### **2.5.5 - Integridade Superficial**

De maneira conjunta com a precisão de forma e a rugosidade superficial, a integridade superficial de modo decisivo determina ou exerce um certo controle no comportamento das peças em trabalho. A formação de cavaco produz altas forças de restauração, induzindo a um estado de tensão residual na superfície e subsuperfície da peça. Um aumento no avanço eleva a tensão residual superficial que pode ser um decréscimo da tensão que já era de compressão ou aumentá-la no caso de ser já de tração. A peça, cujo material em estudo é de aço ABNT 52100, sendo apenas temperada tende a mostrar a tensão superficial de tração. Caso seja temperada e revinida de maneira apropriada, normalmente apresenta tensões superficiais de compressão.

A integridade da superfície usinada pode ser definida como um conjunto de fatores que são conseqüentes do processo de geração de tal superfície e são os seguintes (60) :-

- rugosidade superficial
- alterações de superfície e subsuperfície
- tensões residuais

Para termos um alto nível de integridade de superfície é preciso que se faça um controle rigoroso dos fatores que a determinam. Esses fatores já discriminados serão abordados com maior ênfase nos capítulos três e quatro, respectivamente.

Uma abordagem com mais detalhes será feita no capítulo três.

### 2.5.6 - Forças de Usinagem

As forças de usinagem no torneamento de aços duros não são necessariamente altas, em relação as suas durezas, em função dos seguintes efeitos:-

- \* pequena deformação plástica do cavaco, devido a formação de trincas;
- \* área de contato ferramenta-peça relativamente pequena; (reduz a força de atrito)

Entretanto, durante a usinagem de aços no estado endurecido, a abrasão intensa e a alta temperatura de corte intensificam o desgaste da ferramenta. A superfície de folga desgastada, em conjunto com a aresta de corte (destruída ou semi destruída) elevam as forças, principalmente a força de profundidade. Isto acelera os desgastes futuros.

Segundo Nakayama, K. *et alli* (18), pode-se observar um aumento considerável na força de profundidade  $F_p$ , considerando que o aumento da força de corte não foi grande, quando da usinagem de um aço para rolamento (Hv 720). Para o caso de um aço normalizado (Hv 220), contudo, somente um pequeno aumento é notado em ambas as forças.

O aumento da força de profundidade, devido ao desgaste da superfície de folga, pode ser diminuído de algum valor, através da inclinação da ferramenta, assim também através de aumento do ângulo de folga. Embora isso faça com que o ângulo de saída fique mais negativo, observa-se uma diminuição aparente na força de profundidade e praticamente nenhuma variação ocorre na força de corte.

## 2.6. - APLICAÇÕES DE FERRAMENTAS DE MATERIAL CERÂMICO NA USINAGEM DOS METAIS

### 2.6.1 - Material Cerâmico - Aspecto Geral

Num aspecto mais simples, os materiais cerâmicos são considerados as substâncias usualmente formadas por compostos de elementos metálicos e não metálicos. Assim  $MgO$ ,  $BaTiO_3$ ,  $SiO_2$  e  $SiC$  são compostos cerâmicos relativamente simples. Outros mais complexos são as argilas, os espinélios magnéticos, a mulita, os



vidros amorfos etc...Alguns compostos como o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  são facilmente reconhecidos como cerâmicas. Pode-se observar que muitos materiais contêm somente elementos metálicos e outros, somente elemento não metálico. Não há uma divisão rigorosa entre ambos. Faremos a seguir, resumidamente, uma explanação sobre as propriedades dos materiais cerâmicos (19).

### 2.6.2 - Propriedades Elásticas

Os materiais cerâmicos apresentam elevado módulo de elasticidade  $10^7$  a  $6 \times 10^7$  (psi), decorrente da força das ligações interfaciais. O módulo de elasticidade aumenta quando da aplicação de tensões de compressão, diminui sob o efeito de tensões de tração (exceto os polímeros lineares), diminui a medida que a temperatura aumenta, pois a expansão térmica aumenta a distância interatômica.

O módulo de cisalhamento "G" é relativamente constante em pequena faixas de deformação. Ele se relaciona com o módulo de elasticidade "E" através do coeficiente de Poisson " $\nu$ ". Deve ser observado que qualquer anisotropia em um dos dois módulos será refletida pelo outro ( $G = \nu E$ ).

### 2.6.3 - Resistência Mecânica

Como os materiais cerâmicos são geralmente não dúcteis, suas características de resistência mecânica diferem bastante das dos metais. Um material cerâmico não dúctil é muito resistente à compressão porque ele não se rompe por deslizamento e, portanto, o comportamento a compressão está diretamente relacionado às suas forças interatômicas. Um cálculo baseado exclusivamente nas forças interatômicas indica que a resistência mecânica é da ordem de 10% do módulo de elasticidade. Na prática, os produtos cerâmicos comerciais têm resistência à tração de somente 1% deste valor (0,01 de  $E/10$  ou  $E/1000$ ). (19)

As macroestruturas da maioria dos materiais cerâmicos, inclusive o vidro, são tais que há pontos onde as tensões se concentram. Tais pontos podem ser poros, contorno de grão, ou microfissuras verdadeiras; assim há muitos lugares em que as

fendas podem ter início. Segundo Vigneau J. & Bordel, P. (30), imperfeições de tamanho tão pequeno na ordem de poucos microns podem afetar a tensão de ruptura das ferramentas de materiais cerâmicos; contrapondo-se com as imperfeições maiores que 100 microns para os metais. A resistência à tração de um material frágil é então determinada pela probabilidade de que um defeito possa ser encontrado, de forma a produzir uma concentração de tensões superiores à tensão crítica de ruptura.

#### **2.6.4 - Dureza**

A dureza da aresta de corte de maneira geral é três vezes mais que a da peça. No torneamento de aços cuja dureza é superior a 60 RC ( $\pm 758$  Hv), é necessário o uso de uma ferramenta com uma dureza próximas de 2274 Hv. (18). Os insertos cerâmicos que apresentam maior dureza, a temperatura ambiente, são as cerâmicas mistas ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$  ou  $\text{TiN}$ ), cuja cor é marron escuro e as à base de alumínio reforçada com "Whiskers" de carboneto de silício ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC(w)}$ ), apresentando-se na cor verde clara. A dureza desses insertos é da ordem de 2000 a 2200 Hv, respectivamente. (19-20)

No caso de materiais para ferramentas, um conceito importante é a dureza a quente. Segundo Esugwu, E. Q. & Wall Ba NK, J.(20), as ferramentas cerâmicas tem dureza maior que as de metal duro sinterizado, tanto à temperatura ambiente quanto em temperatura elevada.

#### **2.6.5 - Tenacidade**

A tenacidade dos materiais cerâmicos depende de numerosas variáveis. Entretanto em se tratando de cerâmicas para ferramentas, pode-se dizer que as mesmas têm tenacidade inferior ao do metal duro. A adição de uma fase secundária à cerâmica óxida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) com  $\text{TiC}$  às ferramentas a base de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) é uma maneira mais recente que consiste na incorporação de "Whiskers" de ( $\text{SiC}$ ) na matriz de ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) possuem uma melhor tenacidade. Com tal incorporação tais ferramentas ficam mais adequadas à usinagem mais severa (23).

### 2.6.6 - Condutividade Térmica

Os materiais cerâmicos apresentam baixa condutividade térmica. Neles a transferência de energia é diferente daquela que ocorre nos metais. Dois fatores interrelacionados contribuem para que haja essa diferença:-

- a) os materiais cerâmicos possuem poucos elétrons livres;
- b) as fases cerâmicas são transparentes à energia radiante. A ausência de elétrons livres reduz a condutividade térmica e a transparência aumenta a transferência de energia radiante, particularmente em temperaturas elevadas.

A baixa condutividade térmica dos materiais cerâmicos, quando aplicadas na construção de ferramentas de corte, torna o seu uso restrito a usinagem onde predomina o corte contínuo. Sendo que no corte interrompido, como exemplo o fresamento, onde existe resfriamento e aquecimento, seu emprego era até então não aconselhável. Contudo, segundo Bohes, L. (22), nas novas gerações de ferramentas, a base de  $(Si_3N_4)$ , esta propriedade (condutividade térmica) foi sensivelmente melhorada. Isto permitiu desvendar a dúvida de que as ferramentas cerâmicas não são adequadas à usinagem onde ocorra o corte interrompido.

### 2.6.7 - Materiais Cerâmicos - Ferramentas de Corte

As ferramentas de material cerâmico ou ferramentas cerâmicas foram introduzidas no mercado durante a segunda guerra mundial (1939 a 1945). As primeiras não tiveram boa aceitação, devido a sua baixa resistência à ruptura, o que estava intimamente ligado com a porosidade do material prensado. No início, o uso das mesmas limitou-se ao corte contínuo de materiais "moles" e ferros fundidos, com velocidade de corte e avanços muito moderados. Às causas desse fraco desempenho inicial, deve-se somar ainda o uso de equipamentos não apropriados (baixa rigidez dinâmica) (20).

Atualmente as ferramentas cerâmicas podem ser divididas em dois grandes grupos, a saber: óxido de alumínio e nitreto de silício. Esses grupos podem-se subdividir, diferenciando entre si por composição química, processo de manufatura e propriedades (21).

### 2.6.8 - Ferramentas a Base de Óxido de Alumínio

As ferramentas à base de alumínio podem ser puras: ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ou ainda com adição de óxido de zircônio ( $\text{ZrO}_2$ ), compactadas a frio e denominadas cerâmicas branca. Podem ainda ser mistas.  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$  ou  $\text{TiN}$ , na cor marrom, compactadas a quente.

Uma terceira subdivisão das ferramentas cerâmicas óxidas são os CERMETS, que é um material composto, ou seja, há uma ou mais fases cerâmicas e a fase metálica. Os principais componentes são os carbonetos ou nitretos de titânio mais o níquel ( $\text{Ti(C,N)} + \text{Ni}$ ), e ainda o carboneto de molibdênio ( $\text{MoC}$ ) (22).

Uma outra subdivisão, bem mais recente, consiste na incorporação de "Whiskers" de carboneto de silício ( $\text{SiC}$ ) na matriz do ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), resultando num material composto ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiCW}$ ). (23)

### 2.6.9 - Ferramentas a Base de Nitreto de Silício ( $\text{SiN}$ )

Os fabricantes de tais ferramentas oferecem-nas numa série de composição químicas diferentes, como também sob diversos processos de fabricação, proporcionando propriedades físicas e mecânicas distintas. A cor das mesmas varia entre o cinza escuro e o preto. Dentro deste grupo pode-se destacar o SIALON, nome que originou a sua composição química (Silício-Si, alumínio-Al, oxigênio-O e nitrogênio-N).

Uma outra variante é o nitreto de silício, assim chamado, devido ao alto teor dessa substância, com adição de pequenas porcentagens de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Y}_2\text{O}_3$  - (óxido de ítrio). Geralmente estas ferramentas sofrem compactação a quente (22).

### 2.6.10 - Uso das Ferramentas Cerâmicas

As ferramentas cerâmicas não foram colocadas em uso com a finalidade de substituir o metal duro, mas sim complementá-lo. Elas encontraram aplicação na usinagem de ferros fundidos, passando pelo aços endurecidos até às superligas, como

o inconel e o monel. Contudo, devido as suas características intrínsecas, baixa tenacidade, baixa resistência a tração, baixa condutividade térmica, alguns cuidados extras tornam-se necessários quando da utilização de tais ferramentas é a saber:-

#### **2.6.10.1 - Geometria de Corte**

**Ângulo de saída:** De modo geral usam-se valores negativos. A geometria negativa coloca a ponta de ferramenta sob a ação de compressão e elimina a formação de trincas devido a tração. Também é de praxis o uso de arestas de corte chanfradas, como meio de segurança (20).

**Ângulos de folga:** A preocupação quanto ao ângulo de folga, deve-se ao fato da predominância do desgaste da superfície de folga no processo de deterioração da ferramenta, quando em condições normais de corte. O ângulo de folga deve ser suficientemente grande para evitar o atrito da ferramenta com a peça. Entretanto, esse valor não deve ser exagerado para que não ocorra o enfraquecimento da aresta de corte (20).

**Ângulo de posição:** O fator que limita esse ângulo é a geometria da peça. Entretanto, Vigneau, J. & Boulanger, J.(24), recomendam um ângulo de posição  $\chi = 45^\circ$ , quando da usinagem uma de liga de níquel (inconel 718). O objetivo do uso desse ângulo é evitar o desgaste do entalhe. A SPK (fabricante de insertos cerâmicas), fornecem ferramentas para torneamento externo e interno com esse ângulo variando entre  $45^\circ$  a  $107^\circ$  (25).

**Ângulo de ponta:** Deve se dar atenção especial ao mesmo em operações de desgaste. Ângulo de ponta pequena enfraquece a ponta de ferramenta, diminuindo a vida em operações severas, contudo, em operações de copiagem às vezes é imprescindível o uso de ângulo de ponta pequeno.

#### **2.6.10.2 - CONDIÇÕES DE CORTE**

Parâmetros de cortes, tais como, a velocidade de corte, o avanço e a profundidade devem ser escolhidos conforme o tipo de operação (torneamento,

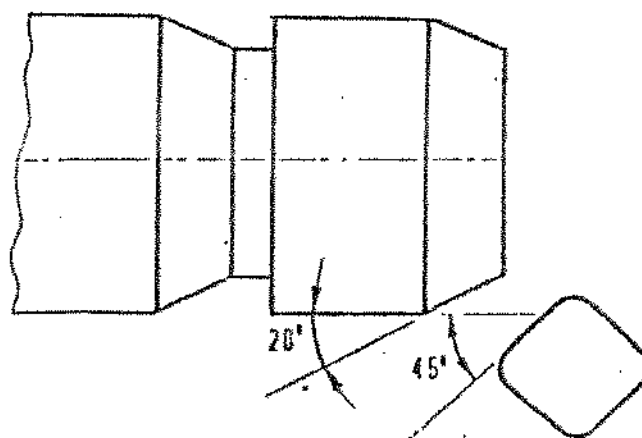
fresamento, furação, etc.), o material a ser usinado e as condições da máquina ferramenta.

No que concerne ao uso ou não de fluídos de corte refrigerantes depende da classe da ferramenta. Entretanto, o seu uso é limitado, em função do mesmo provocar choque térmico, para ferramentas cerâmicas que apresentam baixa condutividade não se recomenda o uso de refrigerante. Por outro lado, o emprego de uma fase metálica em tais materiais (por ex: TiN e TiC) permite que as mesmas sejam utilizadas com ou sem refrigeração, sem a perda de eficiência (20).

Um fator muito importante quando se trata da usinagem de aços endurecidos em condições de acabamento é a rigidez da máquina ferramenta. As máquinas CN e CNC em uso parecem satisfazer esse fator fundamental que vem a ser a rigidez dinâmica.

Alguns cuidados extras devem ser tomados quando do uso de ferramentas frágeis, como as cerâmicas. O início e o término do corte e o percurso de avanço são alguns deles. Alguns fabricantes de ferramentas (25) citam recomendações importantes.

**Início do corte:-** deve-se realizar um pré-chanfro para corrigir desvio radial da peça bruta quando da primeira operação. Vigneau, J. & Boulanger, J. (24) fazem uma observação quanto ao valor deste ângulo, relacionando-o ao ângulo de posição da aresta de corte. Segundo os pesquisadores, o ângulo de pré-chanfro não deve coincidir com o ângulo de posição  $\chi$ . Observar figura 2.6.1



**Fig. 2.6.1 - Execução do pré chanfro para evitar quebras prematura da aresta de corte. (24)**

**Término do corte:-** o término brusco do corte pode levar à quebra prematura da ferramenta, principalmente em se tratando de ferramentas frágeis como as de material

cerâmico. Segundo os fabricantes de ferramentas (25), isso pode ser evitado do seguinte modo: no que tange às operações de faceamento que terminam em furo, as mesmas devem ser encenadas antes que a ferramenta chegue a atingi-lo. O restante do material a ser removido deve sê-lo em operação posterior de torneamento interno. (fig. 2.6.2)

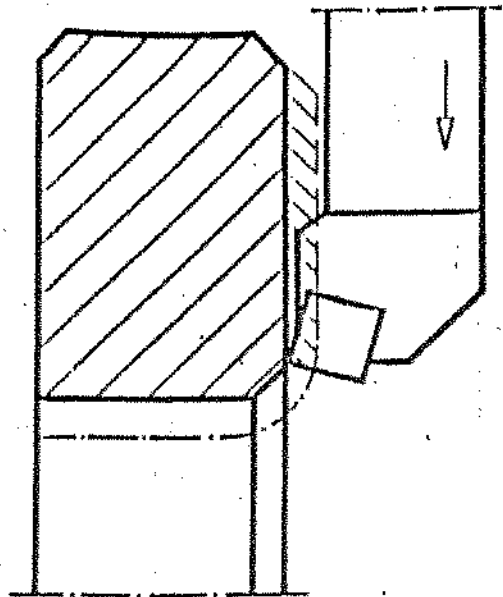


Fig. 2.6.2 - Término da operação de faceamento antes de corrigir o furo. (57)

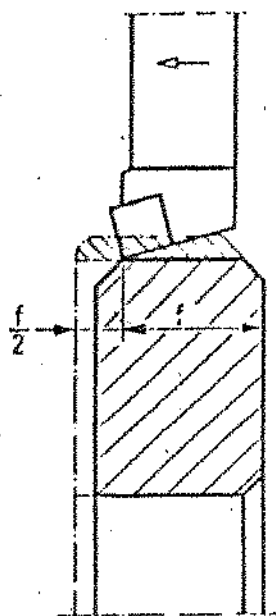


Fig.2.6.3 -Término da Operação de torneamento longitudinal antes da saída da ferramenta. (57)

\* torneamento longitudinal

Neste caso, também deve-se parar a ferramenta antes do término do corte. O restante do material deverá ser removida em operações posteriores. Em vários casos, uma redução do avanço pela metade é suficiente. (fig.2.6.3)

De outra maneira, Shaw, M.C et ali (26), diz que a soluções apresentadas na execução de operações de faceamento e torneamento longitudinal não são propícias, do ponto de vista de produtividade. A solução mais adequada, segundo os pesquisadores supra citados, para evitar a formação do pé (é causa da quebra prematura da aresta de corte) é alterar o ângulo no qual a ferramenta deixa a peça. Isto é, fazendo-se um chanfro na extremidade ou marco de saída da ferramenta. Pode ser executado em operações de usinagem, ou quando do forjamento ou fundição, previr nos projetos das matrizes.

### 2.6.11 - Aplicação

A princípio as ferramentas cerâmicas foram empregadas principalmente na usinagem de ferro fundido (torneamento e fresamento). Com novos avanços tecnológicos, na área de materiais, ou seja, lançamento no mercado, de ferramentas a base de nitrato de silício e mais recentemente ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  + "Whiskers" de SiC), vislumbrou-se um novo campo de aplicação para essas ferramentas. As superligas (ligas de silício, muito usadas na indústria aeronáutica) e os aços endurecidos representam novos campos de aplicação das mesmas.

O lado crítico da aplicação das ferramentas cerâmicas está na usinagem dos seguintes materiais (27):-

Alumínio - reage quimicamente com ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

Ligas de Titânio - tendência à reações químicas

Magnésio, Berílio e Zircônio - São inflamáveis na temperatura do trabalho das ferramentas cerâmicas.



## 2.7 - USO DO NITRETO DE BORO CÚBICO (CBN) NA USINAGEM DOS METAIS

As cerâmicas a base de nitrogênio são substâncias com fórmula geral  $M_x N_y$ , onde M é um metal e N um Nitrogênio. Elas mostram freqüentemente extensas regiões de homogeneidades, apresentam uma solubilidade sólida considerável. O nitrato de boro cúbico (CBN), tornou-se um material muito importante, dentro da classe das cerâmicas não sólidas. Ele é usado em diversas aplicações envolvendo severas condições, ambientais; térmicas; químicas e mecânicas.

Nos idos de 1957, seguindo o desenvolvimento de um vaso de reação capaz de atingir as temperaturas de até  $2500^{\circ}\text{C}$  e pressões de até 100000 (atm), nitrato de boro cúbico (CBN), cujo nome é o Borazon, disponível comercialmente desde 1972. Os fornecedores mais conhecidos são:- (Borazon (GE) e o Amborite (DeBeers) (28) )

### 2.7.1 - Propriedades - CBN

O CBN possui dureza KNOOP em torno de  $4.800\text{ kg/mm}^2$ , sendo inferior apenas ao diamante. A figura 2.7.1 mostra a dureza em função da temperatura para diversos materiais, normalmente usados em ferramentas de corte. Além disso, ele possui boa estabilidade térmica, resistência à oxidação e alta condutibilidade térmica (28).

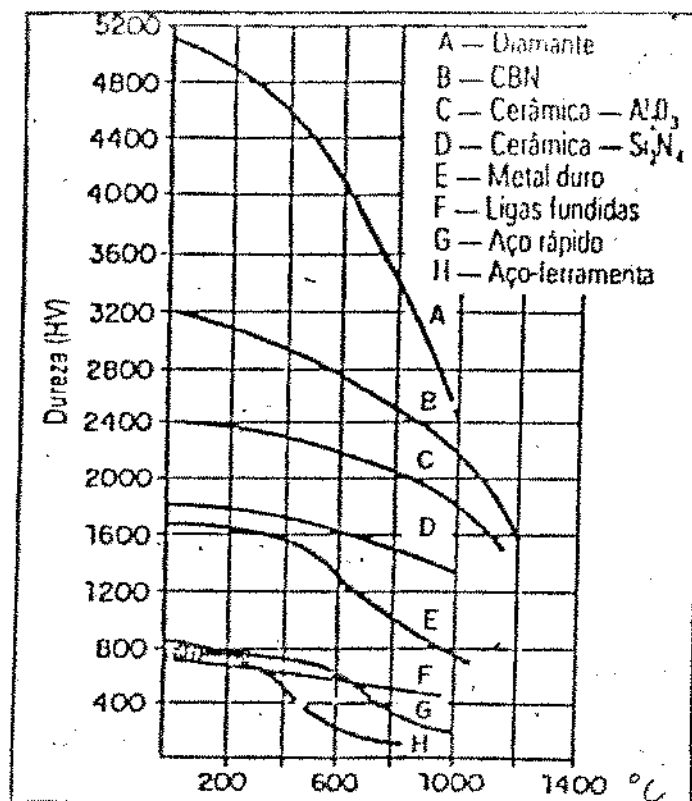


Fig. 2.7.1 - Variação da dureza com a temperatura para diferentes materiais e ferramentas. (22)

### 2.7.2 - Aplicação do CBN na Usinagem dos Metais

Devido à alta resistência do impacto, o CBN pode ser usado em corte severos, interrompidos e na remoção de carepas tenazes, abrasivas e irregulares, de peças fundidas e forjadas. Ele também pode ser usado no acabamento, onde rugosidades inferiores a 1 microm são viáveis de serem obtidas (27).

Não devemos deixar de mencionar que as ferramentas do CBN são relativamente caras e para se obter altas taxas de produção com um custo mínimo das influências da geometria e dos parâmetros de corte, tais como, velocidade de corte, avanço e a profundidade, sobre a vida da ferramenta.

### 3 - INTEGRIDADE DE SUPERFÍCIE E SUBSUPERFÍCIE

A superfície de uma peça tem dois aspectos importantes que precisam ser definidos e controlados. O primeiro se refere às irregularidades geométricas da superfície e o segundo se refere às alterações metalúrgicas de superfície e da camada superficial. Este segundo aspecto denominado "Integridade de Superfície". Tanto o acabamento de superfície como a integridade de superfície devem ser definidos, medidos, e mantidos dentro de limites especificados no processamento de quaisquer produtos (31).

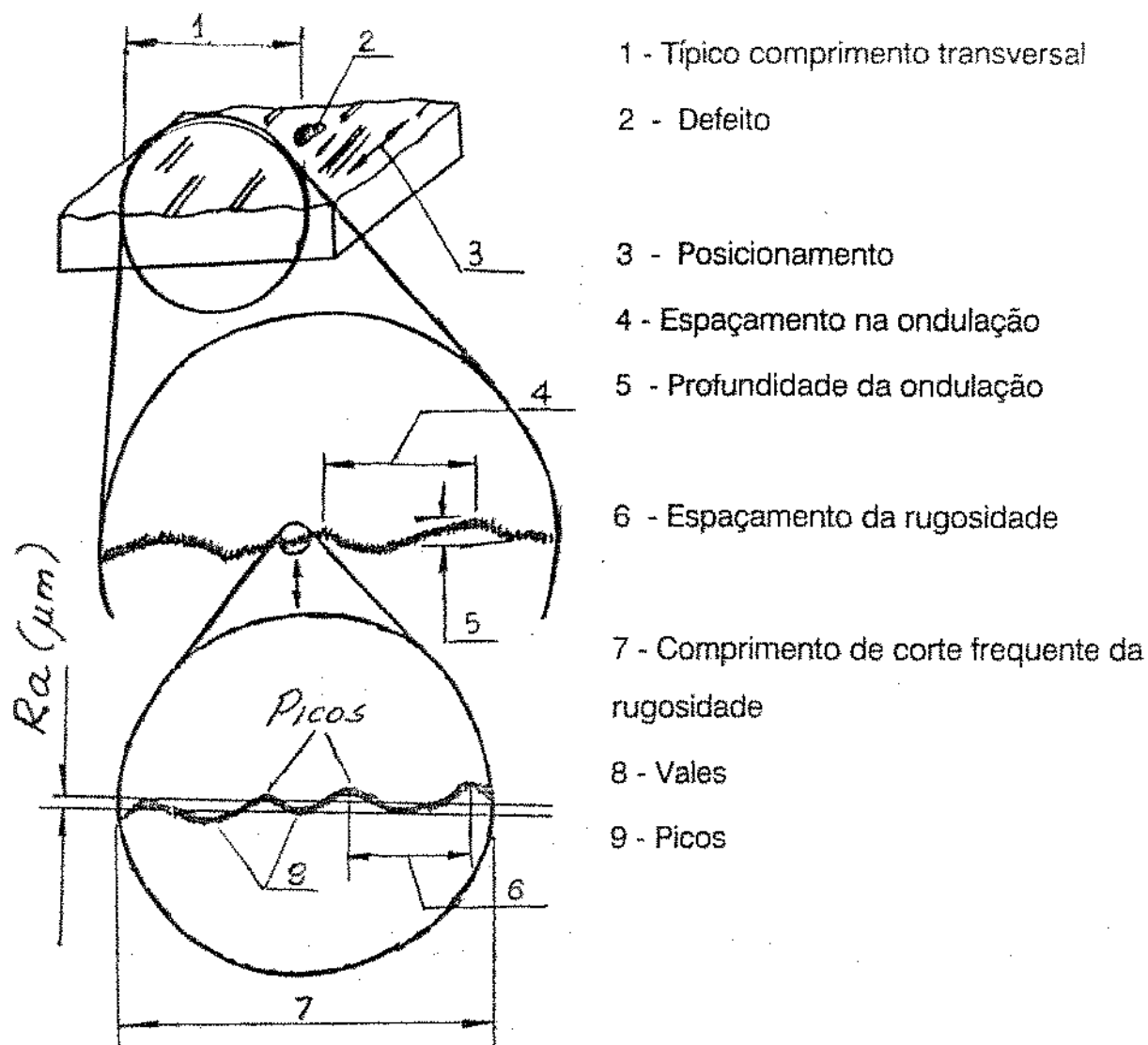
Ao estudarmos a integridade de superfície, não podemos deixar de mencionar a importância do acabamento dessa superfície. Uma coisa é você abordar e estudar apenas um desses aspectos, ou seja, não ter um conhecimento completo do comportamento da peça em trabalho. Portanto, é necessário a abordagem e o estudo de ambos para que se possa ter uma melhor idéia do comportamento da peça em serviço.

Sendo assim, é necessário tecermos considerações referentes aos aspectos básicos do acabamento de superfície ou textura de superfície. (32)

O acabamento de superfície conforme descrito em (33), se refere às irregularidades geométricas das superfícies de materiais sólidos e às características dos instrumentos para medir rugosidade. Sendo que a textura da superfície é definida em termos de rugosidade, ondulação, posicionamento e falhas que estão ilustrados na figura 3.1.

A rugosidade consiste de pequenas irregularidades na textura da superfície, em geral inclusive as que resultam da ação inerente ao processo de produção, como as marcas de alimentação produzidas durante a usinagem. Isto é, marcas deixadas pela ferramenta durante o processo produtivo.

A ondulação é um componente mais espaçado da textura superficial e pode resultar de fatores tais como deflexões, vibrações do conjunto máquina, peça e ferramenta. Enquanto que o posicionamento é a direção predominante das marcas deixadas pela ferramenta na superfície usinada. No que concerne as falhas, podemos afirmar que são interrupções da superfície não intencionais, inesperadas e indesejáveis. Por exemplo, rachaduras, moissas(cavidades), riscos e rugosidade.



**Fig.3.1 Esquema de Rugosidade e Ondulação sobre uma Superfície com Posicionalmente Unidirecional e uma Falha. (59)**

A especificação e a fabricação de superfícies não danificadas ou melhoradas requer uma compreensão do inter-relacionamento entre metalurgia, usinabilidade e ensaios mecânicos. Para satisfazer esta necessidade foi introduzido, uma disciplina no ensino denominada "Integridade de Superfície", que tem aceitação mundial. A tecnologia de integridade de superfície descreve e controla as muitas alterações possíveis produzidas em uma camada superficial durante os processos de fabricação, incluindo seus efeitos sobre as propriedades do material e sobre o desempenho da superfície em serviço.

O estudo integridade de superfície abrange o estudo e o controle tanto da rugosidade ou topografia de superfície como da metalurgia da superfície. Estes dois fatores influenciam na qualidade da superfície usinada e da subsuperfície, e ficam

extremamente significativos na fabricação de componentes estruturais que devem resistir a altos esforços estáticos e dinâmicos. Por exemplo, quando a carga dinâmica for o fator principal em um projeto, a resistência útil é limitada freqüentemente pelas características de fadiga dos materiais. Falhas por fadiga quase sempre formam núcleo na superfície de um componente ou próximo da mesma; de maneira semelhante, a corrosão por esforço é também um fenômeno de superfície. Portanto, a natureza de uma superfície, tanto do ponto de vista topográfico como do ponto de vista metalúrgico, é importante no projeto e na fabricação de equipamento crítico.

A importância de integridade de superfície é ainda maior quando existem grandes esforços em presença de ambiente extremos. Ligas resistentes ao calor, resistentes à corrosão e de alta resistência são usadas em grande número de aplicações desse tipo. Ligas típicas usadas nestas aplicações incluem aços liga com dureza de 50 a mais de 60 Rc e ligas com tratamento térmico cujos níveis de resistência alcançam 2070 MPa (300 Ksi). Outros materiais incluem aço inoxidável, ligas de titânio e ligas a base de níquel para alta temperatura e resistência a corrosão.

Infelizmente, as ligas próprias para aplicações de alta resistência freqüentemente são de difícil usinagem. Os aços duros e as ligas de alta temperatura, por exemplo, devem ser torneadas e frezadas a baixas velocidades, que tendem a produzir crescimento na aresta (aresta postiça de corte), produzindo conseqüentemente um acabamento ruim. A usinagem destas ligas tende a produzir indesejáveis alterações metalúrgicas da superfície, as quais tendem a reduzir a resistência à fadiga, conforme se verificou. Entre os problemas típicos de integridade de superfície originados através de operações envolvendo remoção de cavacos se incluem:

- Queimaduras de abrasivos em componentes de sistema do trem de aterrissagem de aviões, construídos com aço de alta resistência;
- Martensita não temperada em furos feitos com broca em componente de aço;
- Rachaduras de retífica na seção da raiz de conchas para turbina a gás feitas com material fundido a base de níquel;
- Diminuição da resistência à fadiga de partes produzidas através de usinagem por descarga elétrica;

- Distorção em componentes delgados;
- Tensões residuais de superfícies induzidas pela usinagem, com seus efeitos sobre distorção, fadiga e corrosão por esforço.

### **3.1 - Alterações de Superfície**

Os tipos de alterações de superfície associados a trabalhos de remoção de cavaco (34), podem ser:-

#### **A. Mecânicas**

- deformações plásticas resultantes de trabalhos a quente ou a frio;
- rasgos e emendas e defeitos do tipo de trincas (associados a engrossamento da aresta de corte na usinagem);
- alterações de dureza;
- trincas macro e microscópicas;
- tensões residuais distribuídas na camada superficial;
- introdução de inclusões de processamento;
- resíduos com deformação plástica devido a retificação;
- vazios, buracos, rebarbas, ou materiais estranhos engastados na superfície.

#### **B. Metalúrgicas**

- transformações de fases;
- tamanho e distribuição de granulação;
- tamanho e distribuição de precipitação;
- inclusões estranhas no material;
- geminação (agrupamento de dois ou mais cristais);
- recristalização;

- martensita não temperada ou supertemperada;
- resolução ou reversão da austenita.

### **C. Químicas**

- ataque intergranular; - corrosão intergranular;- oxidação intergranular;
- dissolução preferencial de microcomponentes;
- contaminação;
- fragilização por absorção química de elemento como o hidrogênio e o cloro;
- cavidades ou erosão seletiva;
- corrosão;
- corrosão por tensão;

### **D. Térmicas**

- zona afetada pelo calor;
- material refundido ou redepositado;
- partículas espirradas ou metal refundido depositado na superfície;
- material resolidificado.

### **E. Elétricas**

- mudanças de condutividade;
- mudanças magnéticas;
- aquecimento ou superaquecimento resistivo;

### **3.1.1 - As principais causas das alterações de superfícies produzidas pelos processos de usinagem são:-**

- Altas temperaturas ou altos gradientes de temperatura gerados no processo de usinagem;
- Deformação plástica;
- Reações químicas e subsequente absorção pela superfície usinada nascente;
- Correntes elétricas excessivas;
- Densidades excessivas de energia durante o processamento.

Praticamente todos os métodos de remoção de material produzem condições de alteração da superfície e da subsuperfície. As zonas com alterações mecânicas e metalúrgicas produzidas pelos processos de remoção de material podem também se estender para dentro da superfície até uma profundidade considerável, dependendo de terem sido usadas condições de desbaste ou condições de acabamento no processo de remoção de material.

### **3.1.2 - Alterações de superfície produzidas por operações convencionais de usinagem**

Os métodos tradicionais de usinagem, que são os principais métodos de remoção de cavaco, incluem as operações como torneamento, fresamento, furação, mandrilamento, roscamento e escariação. Temos também os métodos abrasivos, que envolvem as seguintes operações:- retificação, polimento, lixamento. Estas operações referentes a usinagem podem produzir alterações na camada superficial se forem usadas condições excessivamente severas (desbastes) tendem a gerar altas temperaturas e deformações plásticas excessivas. Condições mais suaves (acabamento), são obtidas quando se usam ferramentas adequadas (bem afiadas e com geometria favorável) e quando as condições de usinagem resultam em esforço de usinagem reduzido.



### 3.2 - Efeitos de Superfície na Retificação

Na retificação há cinco parâmetros importantes que determinam se as condições são suáveis ou abrasivas (desbaste ou acabamento), ou sejam:- Especificação do rebolo; Velocidade do rebolo; Descida ou avanço; Preparação do rebolo e Fluido para retificar. Na medida em que os parâmetros de retificação ficam mais agressivos (isto é, rebolos mais duros, maiores velocidades do rebolo, maior avanço, etc.), o processo de retificação tende a ficar mais severo e portanto, com maior probabilidade de propiciar efeitos nocivos superfície. A tab. 3.1 resume as condições suaves (acabamento) de várias ligas.

## Ligas - alta temperatura (a)

**Retificação de Superfície**

rebolo . . . . .	A46HV	C60HV
Velocidade de rebolo, m/s . . . . .	13 - 15	10-15
avanço, mm . . . . .	0,005 - 0,013	0.005-0.013
Velocidade da mesa m/min (c) . . . . .	12 - 30	12-13
avanço transversal, mm . . . . .	1 - 1,25	1-1.25
fluido . . . . .	óleo altamente sulfurizado	(d)

**Retificação Cilíndrica Transversal**

rebolo . . . . .	A60IV	C60HV
Velocidade do rebolo m/s . . . . .	13-15	10-15
Avanço por passada mm . . . . .	0.005-0.013	0.005-0.013
Velocidade de trabalho m/min . . . . .	20-30	20-30
Fluido . . . . .	óleo altamente sulfurizado	(d)

**Tabela 3.1 - Baixa tensão em procedimento de retificação. (59).**

a) Para uma grande variedade de metais (incluindo aços com altas resistência, ligas de alta temperatura e ligas de tração), baixas tensões em retificação praticamente desenvolvem tensões residual de tração muito baixas. Em alguns materiais, a tensão residual produzido próxima da superfície é normalmente de compressão ao invés de tração.

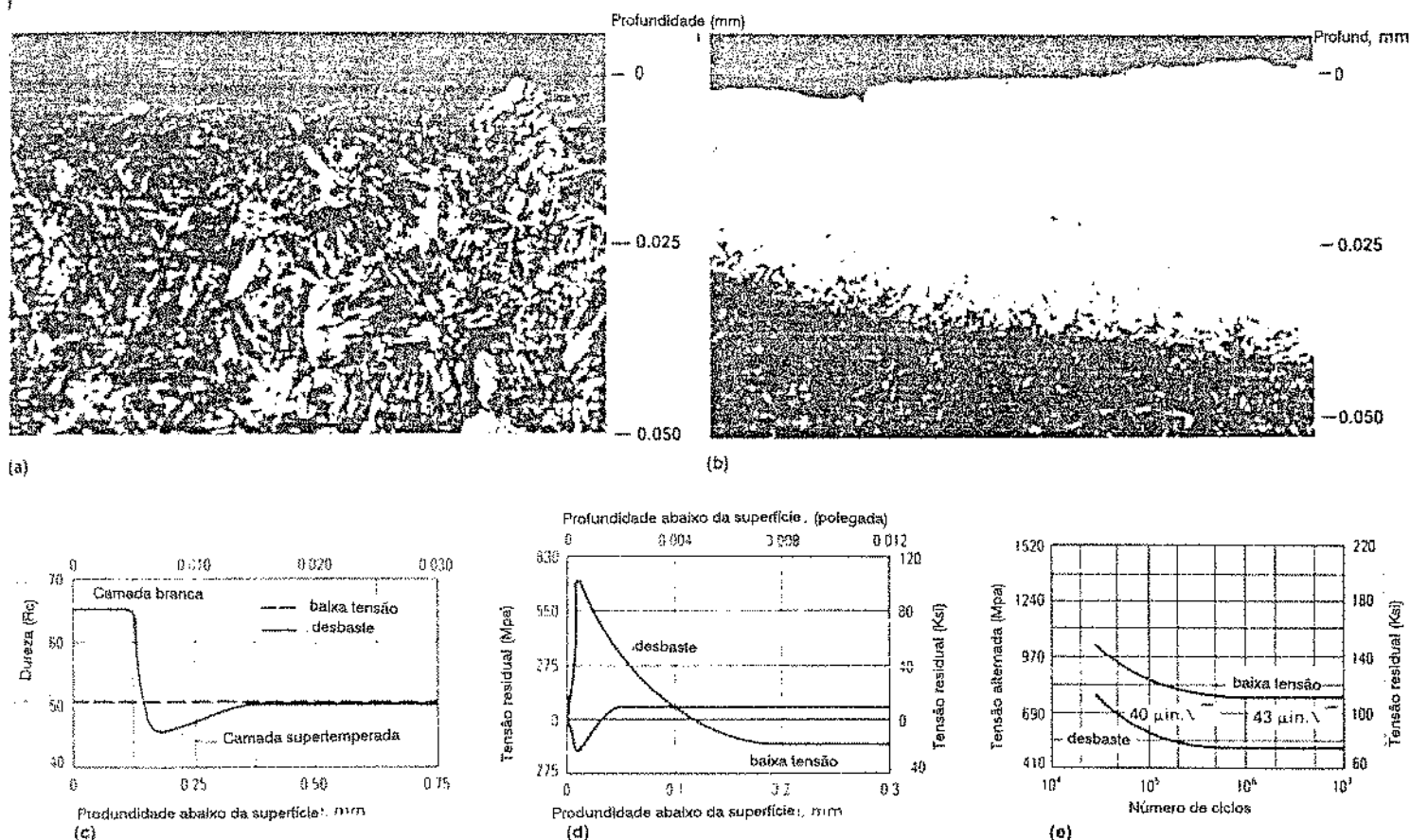
b) Baixas tensões em retificação requerem velocidade do rebolo inferior a 30 m/s. Para aplicar retificação com baixa tensão é preferível ter uma máquina retificadora com velocidade variável. Porque muitas retificadoras não têm a velocidade do rebolo controlada, sendo necessário acrescentar um variador de velocidade.

c) O aumento da velocidade de trabalho acima daquela indicada traz vantagens à integridade de superfície.

d) Alguns fluídos de corte não são usados por razões de saúde.

A retificação abusiva (em forma de desbaste), também tende a produzir tensões residuais dentro da camada superficial alterada. Pode-se facilmente obter um perfil das tensões residuais usando a técnicas de difração do raio-x na superfície e depois penetrando na subsuperfície, repetindo leituras de difração de sucessivas erosões de superfície feitas através de um eletropolimento ou ataque químico. "No decorrer destes fundamentos, discorreremos com mais detalhes na obtenção das medidas das tensões residuais de superfície". Sabe-se que a retificação em condições abusivas produz uma superfície com tensões residuais superficiais de tração e as produzidas em condições suaves, produzem tensões de compressão. Sabe-se também que as tensões residuais têm influência no limite de resistência a fadiga dos materiais. (fig. 3.2a,b,c,d,e).

No caso da tensão residual superficial de tração, o limite de resistência a fadiga diminui. Enquanto que, se a mesma for compressão, o limite de resistência a fadiga é melhorado. Como exemplo, podemos citar que ensaios de fadiga realizados sobre amostras planas indicam que a retificação abusiva pode reduzir consideravelmente a resistência à fadiga conforme mostra a fig. (3.2e). Neste caso, mostra que, na retificação abusiva o limite de resistência à fadiga abaixou de 760 MPa (110 Ksi) para 530 MPa (75 Ksi). Enquanto que a de acabamento aumentou o limite de resistência à fadiga.



**Fig. 3.2 a, b, c, d, e Características superficiais produzidas através de retificação suave e abusiva do aço ABNT 4340. (59)**

a) retificação em condições de baixas tensões as alterações superficiais não são visíveis.

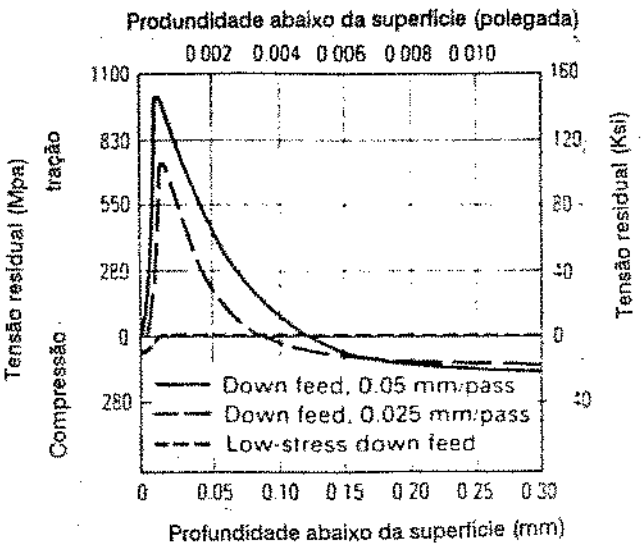
b) a camada branca mostra que a partir de condições abusivas tem-se uma dureza de 65 RC e aproximadamente 0,025 a 0,050 mm de profundidade (ocorre transformação no estado sólido. Resultando eventual estrutura martensítica).

c) colocação de microdureza mostrando alterações numa zona afetada pelo calor medida na ordem de 0,33 mm a partir de condições abusivas.

d) colocação de tensão residual. e) efeito sobre a resistência a fadiga.

3.3 - Tensões residuais na camada superficial

Os processos de usinagem deixam tensões ou esforços residuais na camada superficial. Na retificação a tensão residual superficial tende a ser tração quando as condições usadas são abusivas. fig (3.3).



rebolo . . . . .	A46K8V
Velocidade do rebolo m/min/ . . . . .	1800
Avanço transversal, mm/pass . . . . .	1,25
Velocidade da mesa m/min . . . . .	12
Profundidade de retífica, m/min . . . . .	0,25
Fluído de corte . . . . .	Solúvel em óleo (1.20)
Tamanho da amostra . . . . .	1,5x19x108

Fig 3.3 Tensão residual a partir de retificação do aço D6AC com dureza de 56 RC. (59)

3.4 - Efeitos de propriedades mecânicas

As alterações de superfície produzidas por condições abusivas de remoção de metal geralmente têm pouco efeito sobre as propriedades mecânicas estáticas. Uma exceção importante a isto, entretanto, tem sido uma sensível redução em ductibilidade

e resistência à tração de materiais que foram processados usando a EDM (usinagem através da eletroerosão) seguida de um tratamento térmico.

3.5 - Resistência à fadiga

É de conhecimento que alterações de superfície produzidas na usinagem afetam as propriedades de resistência à fadiga e corrosão por tensão de muitos materiais. Foram realizadas intensas pesquisas sobre aços de alta resistência, como exemplo a tab.(3.2) mostra dados que ilustram o efeito de alguns métodos de usinagem sobre a resistência à fadiga. A guisa de informação, podemos citar o eletropolimento do aço 4340, que resultou em decréscimo de 12% na resistência à fadiga, em comparação com a retificação de baixo esforço.

Ligas	Operações de Usinagem	Limite de resistência em dobramento. 10 <sup>7</sup> ciclos		Retifica em acabamento, %
		MPa	ksi	
Aço 4340, 50 HRC.....	Retifica suave	703	102	100
	Eletropolimento	620	90	88
	Retifica abusiva	430	62	61
Ti - 6 Al - 4 V, 32 HRC .....	Frezamento suave	480	70	113
	Retificação suave	430	62	100
	Frezamento químico	350	51	82
	Frezamento abusivo	220	32	52
	Retificação abusiva	90	13	21
Inconel 718, envelhecido, 44 HRC .....	Retificação suave	410	60	100
	Usinagem eletroquímica	270	39	65
	Retificação convencional	165	24	40
	Usinagem por descarga elétrica	150	22	37

Tab. 3.2 - Efeito de método de usinagem sobre a resistência à fadiga. (35)

De maneira geral, podemos afirmar que a usinagem por ECM, ELP e CM, produz uma superfície livre de tensões residuais de superfície. Estas superfícies mostram uma resistência à fadiga menor quando comparadas com superfícies executadas através de retificação na forma de acabamento, ou seja, com baixo esforço, porque não está presente a melhoria de resistência à fadiga devido a tensões residuais de compressão, as quais estão associadas retificação em condições suaves.

### 3.6 - Efeitos da retificação

Os limites de resistência variam com mudanças selecionadas dos parâmetros de usinagem da operação de retificação fig(3.3). Com a retificação abusiva há uma tendência na formação de manchas ou riscos de martensita não temperada ou martensita supertemperada na superfície. Foi verificado que a presença de qualquer um destes dois microcomponentes associados geralmente com uma queda significativa da resistência à fadiga. Por exemplo, a presença de uma martensita não temperada a uma profundidade de apenas 0.01 mm ou chegando até 0,09 mm, produz uma queda no limite de resistência fadiga de 760 MPa (110 Ksi) para 480 a 520 a (70 ou 75 Ksi) (fig 3.4). Nestas condições estão tipicamente envolvidas tensões residuais superficiais de tração.

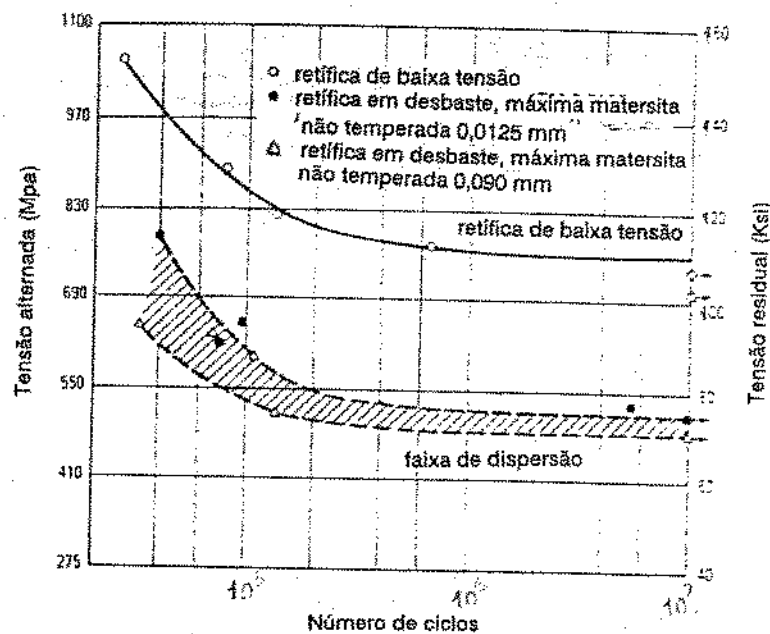


Fig 3.4 Baixa resistência fadiga a partir de retífica abusiva do aço 4340 (têmpera e revinido com dureza de 50 HRC). testes de fadiga (59)

### 3.7 - Medição e efeitos da integridade de superfície.

Em um estudo sistemático da Integridade de Superfície há dois conjuntos recomendados:

a) Dados mínimos

b) Dados padrão

a1. usados na escolha inicial e consiste das medidas de alterações de textura de superfície, macroestrutura, microestrutura e microdureza.(53)

Consiste no seguinte:-

- Medidas de rugosidade de superfície de acordo com (35) ou um mapa microtopográfico;
- Designação ou fotografia do posicionamento;
- Exame microscópico com um aumento de 10 vezes ou menos;
- Indicação macroerosiva através de corantes penetrantes ou fluxo magnético;
- Erosões químicas - Exame microscópico de um corte de superfície alterada (exame do corte deve ser feito de preferência com um aumento de 1000 vezes);
- Indicação de zonas afetadas pelo calor e de alterações de microestrutura;
- (opcional) Um microscópio eletrônico de varredura pode ocasionalmente suplementar as medidas de textura superficial com uma série de fotografia em escala crescente de ampliação ( preferência 20, 200, 1000 e 2000 vezes).

b1. dados-padrão consistem dos dados mínimos em epígrafe e mais os seguintes ensaios adicionais (37):-

- Perfil de tensões residuais ou medidas de distorção;
- Ensaios de fadiga (somente testes de seleção);

As tensões residuais superficiais podem ser medidas por técnica de raio-x. Um perfil de tensões residuais exige a determinação das mesmas não somente na superfície mas também para dentro dessa superfície. Isto pode ser concebido realizando



leitura repetidas de raio-x, com remoção sucessiva de pequenas camadas através de ataque químico ou eletropolimento. (Far-se-á no próximo tópico uma abordagem com mais detalhes a respeito das técnicas de difração de raio-x).

### **3.7.1 - Exame macroscópico**

Exame macroscópico referente ao corte de uma superfície alterada usado para detectar as seguintes alterações microestruturais:-

- Microfissuras;
- Deformação plástica (sugerido um corte paralelo ao posicionamento);
- Ataque intergranular;
- Microdefeitos como sobreposições e inclusões;
- Arestas crescidas de corte ou depósitos de resíduos;
- Camadas refundidas;
- Erosão seletiva;
- Transformações metalúrgicas e
- Zonas afetadas pelo calor.

Estas alterações superficiais podem ser detectadas através da ampliação de um corte da superfície alterada. A amostra fixada em um suporte metalúrgico e um corte dessa superfície é retificado e polido. A aresta dessa mesma superfície é então examinada com um instrumento de ampliação com um fator de 500 a 1000 vezes.

#### 4. - TENSÕES RESIDUAIS SUPERFICIAIS E SUBSUPERFICIAIS

De maneira geral, as tensões residuais são definidas como sendo aquelas que permanecem atuando no material mesmo quando forem cessadas todas as forças externas atuantes (38,39). São classificadas em função do volume de material afetado ou sujeito à sua ação. Esse volume varia de alguns angstroms cúbicos ( $\text{\AA}^3$ ) até alguns milímetros cúbicos ( $\text{mm}^3$ ). Deve-se ressaltar, entretanto, que o fenômeno é sempre o mesmo, isto é, as deformações permanecem internamente no material não importando a sua origem.

Existem três tipos de tensões residuais que são definidas de modo convencional (39,40):

##### **As de 1ª ordem ou do tipo I ou macrotensões. ( $\sigma_1$ )**

São homogêneas no volume de vários grãos e causam deformações uniformes apreciáveis da rede cristalina na região em que atuam. Em geral são as que despertam maiores interesses aos problemas relacionados com a engenharia em função de sua ação sobre os materiais. Atuam na escala de alguns tamanhos de grãos.

##### **As de 2ª ordem ou Tipo II ou Pseudo-Macrotensões ( $\sigma_2$ ):-**

São quase homogêneas e atuam na escala de um tamanho de grão.

##### **As de 3ª ordem ou do Tipo III ou Microtensões ( $\sigma_3$ ):-**

Também são homogêneas em regiões muito limitadas, menores que um grão (isto é, atuam na faixa de alguns espaçamentos interatômicos). Como detalhe, a presença das microtensões provoca pequenas flutuações nos espaçamentos dos planos da rede cristalina do material nos pontos onde estão presentes.

As definições ora apresentadas descrevem condições ideais e se referem exclusivamente a materiais sólidos policristalinos. (é o caso do material em estudo, um aço ABNT 52100). De forma geral essas tensões (1ª, 2ª e 3ª ordens) atuam em conjunto ou superpostas (figura 4.1).

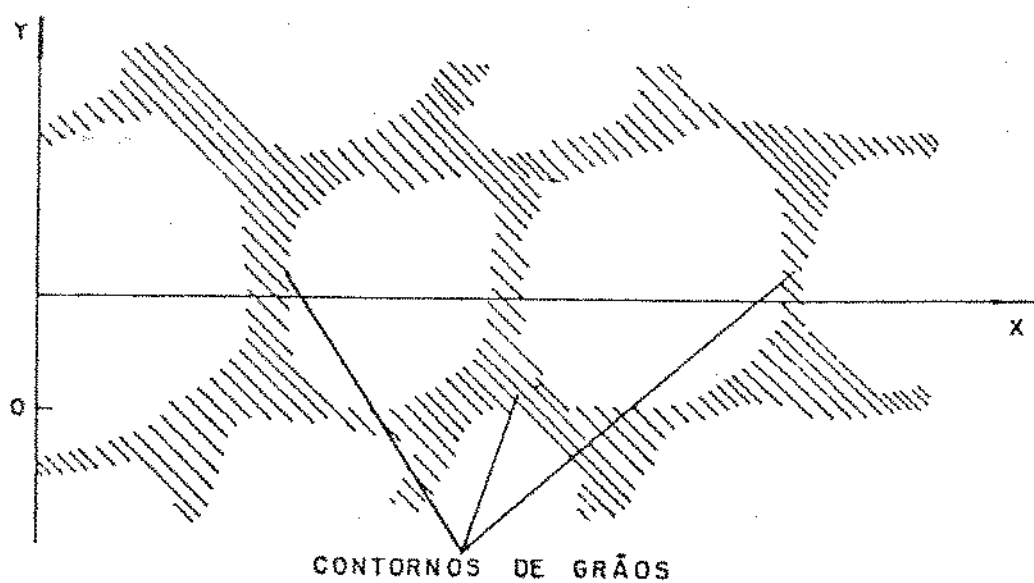
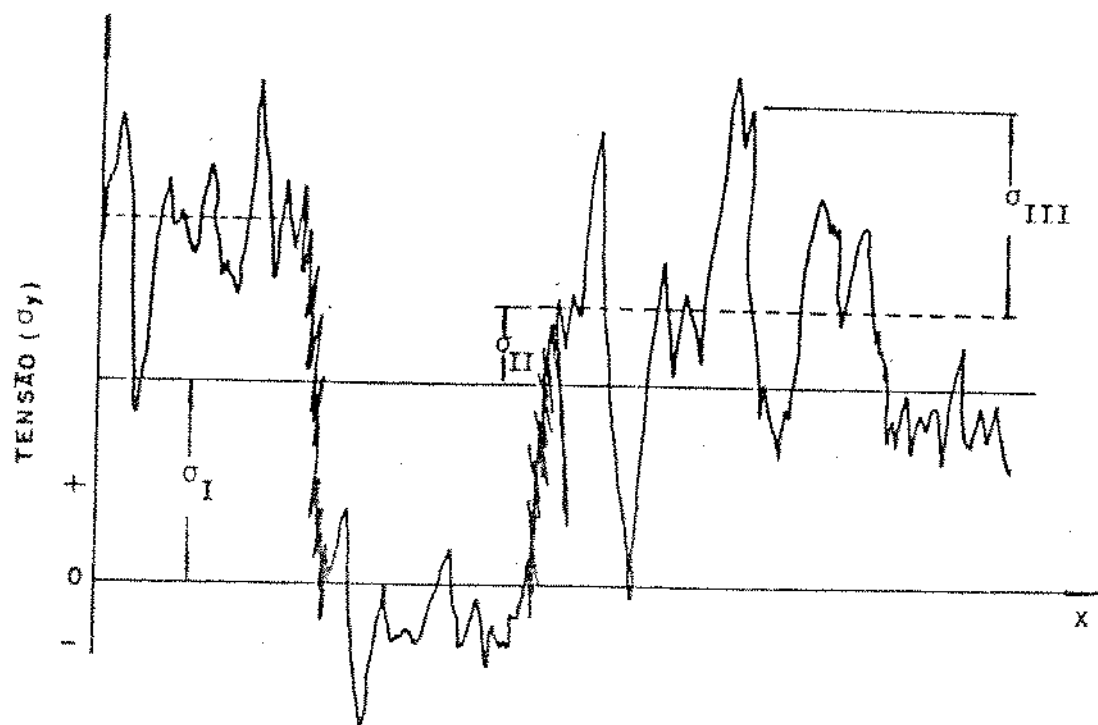


Fig. 4.1 - Esquema mostrando as três ordens de tensão (tensões residuais I, II e III e a superposição das mesmas em vários grãos). (51)

As tensões de primeira ordem também denominadas macrotensões podem ser medidas através de processos mecânicos, usando strain gauges (extensômetros); as de segunda e terceira ordem (microtensões) somente podem ser dimensionadas através da difração de raios-x. Tanto as macros como as microtensões têm efeitos sobre a difração. Enquanto que as macros deslocam de posição o pico de difração, as microtensões alargam-no.

Nesta pesquisa, e na maior parte da literatura específica, o termo tensão residual será utilizado para as macrotensões.

#### **4.1 - Efeitos das Tensões residuais Superficiais e Subsuperficiais**

Tais efeitos na maior parte dos casos, são nocivos, uma vez que podem causar deformações, aumentar a velocidade das transformações de fase e processo de corrosão. As tensões residuais podem também provocar o início de trincas ou aumentar a resistência à fadiga (38,41). Isto é, as tensões residuais podem ou não provocar o início de uma trinca e conseqüentemente a diminuição da resistência à fadiga do material. Enquanto que as tensões residuais de tração ou trativas provocam o início de uma trinca e, conseqüentemente, uma diminuição da vida ou resistência à fadiga do material. As tensões de compressão ou compressivas agem de maneira a aumentar a resistência a fadiga, agindo como se fossem barreiras, impedindo a nucleação e propagação das trincas (42,43).

As tensões de compressão podem ser introduzidas através de tratamentos térmicos (têmpera seguida de revenido); operações de torneamento, retificação, jateamento, fresamento (não muito usada em aços endurecidos). Essa introdução só ocorre, no caso de usinagem, com o uso de parâmetros compatíveis, ou sejam, de acabamento.

Todos os componentes cuja solicitação em trabalho é através de alta tensão de tração, recomenda-se que sua superfície e subsuperfície estejam de preferência em estado de tensões residuais de compressão.

A partir do conhecimento dos efeitos de tensão residual sobre os materiais tornou-se indispensável o seu monitoramento em inúmeros componentes.

Para tal, tornou-se necessário e indispensável acelerar o desenvolvimento de aparelhos e técnicas de medidas que atendam as exigências dos centros de pesquisas da universidade e indústria.

Existem vários métodos disponíveis para medir a tensão residual nos materiais, entre os quais, podemos citar:- mecânicos, ultra-som, eletromagnéticos (Barkhausen), difração de neutrons, difração de raio-x (44, 45, 46, 47, 48).

É importante destacar que todos esses métodos medem a deformação, ou alguma outra propriedade do material que é afetada pela presença da tensão residual. Essa tensão é obtida relacionando a propriedade medida com as propriedades elásticas do material.

Existem alguns parâmetros que devem ser estudados antes de definirmos e adotarmos um método para medir e determinar a tensão residual superficial. São eles:

a) Devemos considerar o **grau de destrutibilidade do método** e se o mesmo introduz alguma quantia de tensão adicional que venha a dificultar, distorcer ou prejudicar a medida, tornando não real o valor da tensão existente na amostra ou no componente.

b) **Resolução do método** - Este parâmetro é de fundamental importância, devemos considerar a área, profundidade e o volume da amostra no qual obtém-se a medida da tensão. Os métodos de baixa resolução determina a tensão média em grandes áreas e em função disso são incapazes de localizar pontos de tensão elevada nos quais ocorreu as principais falhas.

As tensões residuais são quantidades tensoriais, e portanto, devem ser descritas em três dimensões. Os métodos de medidas que determinam apenas quantidades escalares (qualquer grandeza pode ser caracterizada exclusivamente por um número, dimensional ou não), para representar a estado perturbado da rede cristalina e não fornece informações direcionais e por isso, não são adequados à análise mais profundas das condições de tensão da amostra com componente (45).

No que tange ao **aspecto confiabilidade**, diz-se a respeito da precisão e exatidão, que ambas são fundamentais sobre o julgamento do método. É de conhecimento que possuem efeitos diretos sobre o julgamento da qualidade do método. Se a medida não for reprodutiva e sua exatidão não se encontrar dentro de limites

razoáveis ela não deve ser considerada e o método deve ser revisto, modificado, aperfeiçoado ou usar um outro mais adequado.

Não é o principal objetivo desta pesquisa analisar em detalhes todos os métodos existentes na obtenção medidas de tensão residual. As características essenciais dos métodos mais utilizados podem ser vistos e comparadas em função da tabela 4.1 (44, 45, 49, 50).

Método	Destru- tivo	Confiabi- lidade	Direção da Tensão	Resolu- ção	Veloci- dade
Técnicas de alívio de tensão (métodos mecânicos)	Sim	Boa	Sim	$\approx 4 \text{ mm}^3$	Ruim (horas)
Difração de Raios-X	Não, na superfície	Boa	Sim	$< 1 \text{ mm}^3$	excelente
Ultrassom	Não	Ruim	Sim	$> 5 \text{ mm}^3$	Excelente (poucos minutos)
Barbhausen (eletromagnéticos)	Não, na superfície	Ruim	Sim	$> 10 \text{ mm}^3$	Excelente

**Tab. 4.1 - Principais características dos métodos disponíveis para medida de tensões residuais. (52)**

Na atualidade o método mais usado na medida da tensão residual é o de difração de raios-x. Não desmerecendo os demais, é o mais apropriado para medir tensões residuais em função de apresentar as seguintes características:-

a) Não é destrutivo, com possibilidades de fazer medidas em áreas muito localizadas ( $< 1 \text{ mm}^2$ ), dando informações da micro e macrotensões;

b) Como método não destrutivo, permite a caracterização de tensões apenas na superfície. Entretanto, removendo-se as partes através de ataque químico, avaliam-se tensões internas;

c) Sendo um processo de boa repetibilidade e velocidade relativamente alta (uma medida demora aproximadamente 15 minutos) é adequado como controle de muitos parâmetros que atuam no processo produtivo.

#### - Macro tensões

Esse método baseia-se no fato da tensão presente na amostra manifestar-se na rede cristalina dos grãos de formas individualizadas mudando os espaçamentos interatômicos entre os seus planos. Essa variação nos espaços interplanares irá provocar um deslocamento na posição  $2\theta$  dos picos correspondentes aos planos (h, k, l) dos grãos da região deformada. A partir dessa variação em  $2\theta$  medimos a deformação sofrida pela rede cristalina no regime elástico e, utilizando as constantes elásticas E (Módulo de Yong) e  $\nu$  (razão de Poisson) do material, determina-se a tensão deixada na amostra.

$$t = \frac{-E}{2(1+\nu)} \cdot \cotg \theta \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \frac{\partial 2\theta}{\partial (\sin^2 \psi)} = k \cdot \frac{\partial (2\theta)}{\partial (\sin^2 \psi)}$$

$\theta$  = ângulo de Bragg

k = constante de tensão

$\psi$  = ângulo entre o feixe incidente e a normal aos planos cristalinos que difratam.

Dessa equação verifica-se que a relação entre o ângulo de difração  $2\theta$  e  $\sin^2 \psi$  é linear e, se apenas o coeficiente de variação angular é obtido, o valor da tensão pode ser calculado multiplicando-se o coeficiente por k (constante a ser determinada de acordo com o material).

A instrumentação disponível pode variar entre câmara de filme convencional e difratômetros portáteis com dispositivos especiais baseados a detectores sensíveis à posição. Existem no entanto, limitações em relação à profundidade de penetração dos raios-x nos materiais, o que sugere necessidade de técnicas destrutivas na remoção de material quando necessitamos o valor das tensões em profundidades superiores a 10 microns (0,010mm) aproximadamente (41,44). Além disso, devemos considerar a fonte

de erros comuns na utilização do método:- constante elástica utilizada, localização da posição exata do máximo pico de difração, a presença de textura (grau de rugosidade) na amostra, e a presença de microtensões. No entanto, tais adversidades são superadas em função da difração de raios-x ser o único método realmente não destrutivo e o único a medir a superposição das tensões. Uma importante evidência da qualidade do método, está no uso constante das pesquisas realizadas pela Society of Automotive Engineers (SAE), pela Society of Material Science of Japan e pela sua ampla utilização documentada por pesquisadores nos EUA e Alemanha nas duas últimas décadas.

No momento atual podemos contar com aparelhos mais desenvolvidos tecnicamente onde a velocidade das medidas foram aumentadas e a precisão melhorada em função da implantação da automação.

#### **4.2 - Princípios Básicos do Método de Medir Tensões Residuais pela difração de raios-x**

Convém recapitular que os desenvolvimentos teóricos para o tratamento da deformação do reticulado da rede cristalina e sua relação com as tensões (que são as responsáveis por tais deformações), são obtidos a partir da teoria clássica da elasticidade.(48, 51)

Podemos mencionar, também, que a determinação de tensões residuais, usando a difração de raio-x consiste em determinar a variação dimensional no reticulado cristalino do metal, ou seja, a deformação, e converter esse valor em tensão usando os princípios da teoria da Elasticidade. (48, 51)

Neste trabalho, não será feito uma abordagem profunda de cálculos para saber o valor da tensão residual superficial, a máquina de raio-x efetua todas as considerações referentes às medidas (por exemplo correções) e realizando toda parte de cálculo relacionada com a deformação dos cristais.

Podemos dizer também que a difração de raios-x avalia a deformação do reticulado cristalino e a tensão é calculada pela proporcionalidade entre tensão e deformação no regime elástico (49.50).



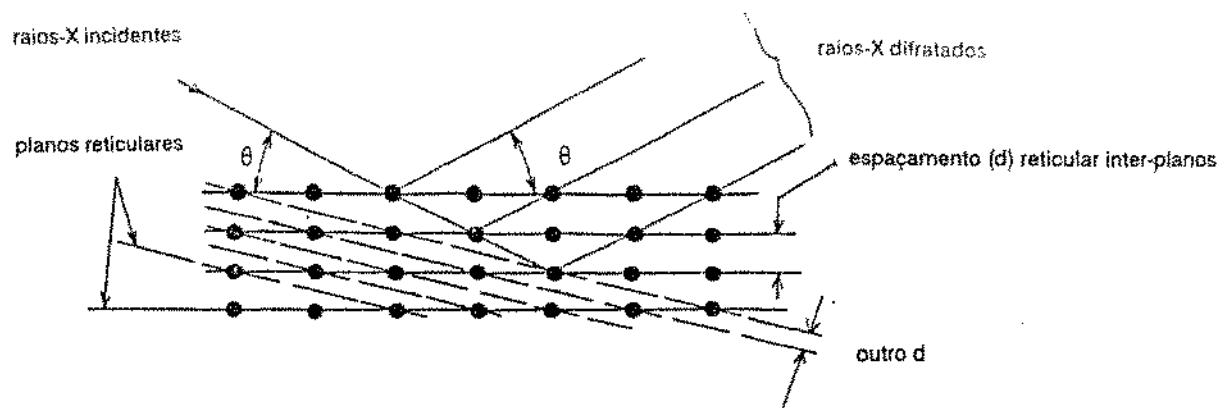
Quando o raio-x é aplicado à matéria, uma parte dele é absorvida pelos átomos, enquanto que outros são enviados de volta em todas as direções da área irradiada. Isto é conhecido como dispersão ou espalhamento de raio-x. As substâncias são amplamente divididas em substâncias cristalinas (ex. metal, sal, quartzo...) e substâncias amorfas (ex. vidro, líquido, gás). As substâncias cristalinas são tais que os átomos estão regularmente arranjados em três dimensões. A razão pela qual uma lâmina de ferro não tem forma externa diferentemente do quartzo, por exemplo, é que ele é um sólido policristalino consistindo de inúmeros cristais finos com tamanho de vários microns.

No caso da dispersão ou espalhamento de raios-x por substâncias cristalinas ao contrário àquelas de substância amorfas, a dispersão do raio-x devido a cada átomo que compõe um cristal são reforçadas em uma certa direção específica com uma certa variação angular muito pequena e são propagados. Este fenômeno é denominado de difração. Quando um ângulo de difração feito por incidência de feixes de raios-x e o raio-x difratado é designado como  $2\theta$  (metade deste ângulo  $2\theta$  é chamado de ângulo de BRAGG), este  $2\theta$  é determinado, a propósito pelo arranjo de átomos. Mais concretamente, as condições de difração são expressas por esta equação de Willian Bragg. A figura (4.1.1) ilustra essas condições.

$$n\lambda = 2d \cdot \sin 2\theta \quad (4.1)$$

onde  $n = 1, 2, 3...$

Qualquer cristal tem diferente dinâmica de estrutura (também chamado de rede plana ou gradeamento) resultante em um número interplanar de acordo. O ângulo de Bragg corresponde a cada um deles. Na figura 4.2 somente  $d$  satisfaz a condição de difração, mas o outro  $d$  pode ser o mesmo se a direção do raio-x incidente é variada propriamente.



$$n\lambda = 2d \cdot \sin^2 \theta$$

$n$  = número inteiro arbitrário

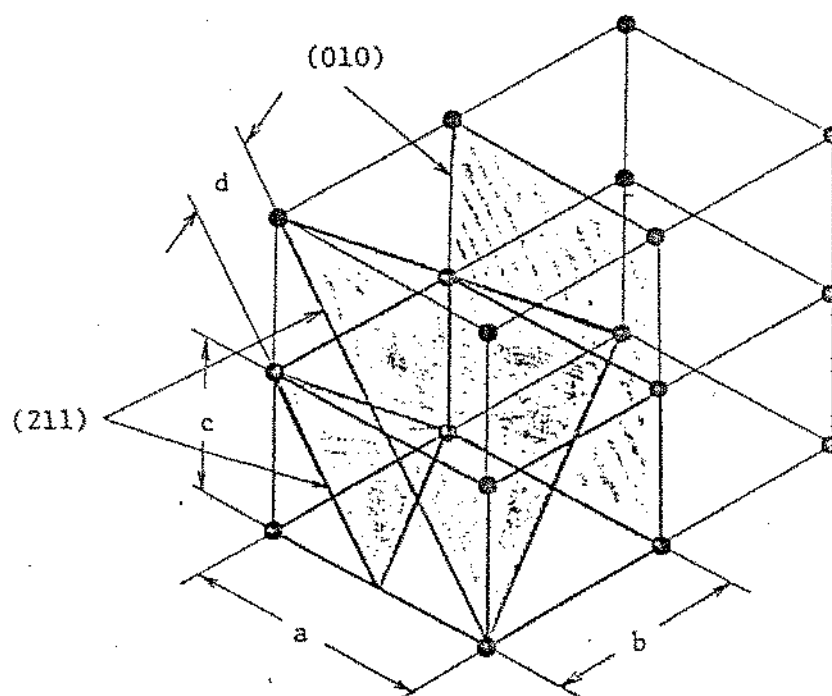
$\lambda$  = comprimento de onda do raio-X (Å)

$d$  = espaçamento reticular inter-planos do cristal (Å)

$\theta$  = ângulo de Bragg

**Fig. 4.1.1 - Condição de difração de raios-x**

A seguir, a (figura 4.2). Mostra um exemplo de estrutura cristalina.



**Fig. 4.2 - Estrutura Cristalina**

1) Conhecendo-se o ângulo de difração  $2\theta$ , é possível identificar substâncias desconhecidas ou aquelas contidas em outras substâncias. Especialmente a precisão da medição do ângulo de difração  $2\theta$  pode esclarecer tensões residuais de acordo com as forças residuais existentes nos metais.

2) Conhecendo-se a intensidade dos raios difratados, é possível ter conhecimento da quantidade de componentes da matéria. A medição da austenita retida é baseada nestes princípios, mas não é o nosso objetivo estudá-la neste trabalho.

Cada distância representada por a, b e c (referentes à fig. 4.2), denotam a direção do eixo referente ao cristal e unidade de comprimento respectivamente e são chamados de constantes de estrutura reticular. Mostrados nessa figura (4.2) estão 3 planos de estrutura reticular sombreados.

Quando os planos da estrutura reticular se interceptam os eixos dos cristais nas posições a/h, b/k e c/l, este grupo de planos da estrutura reticular é denotado por (h, k, l) os quais são conhecidos como índices de Miller. Mais adiante, estes planos equivalentes ao acima que pode ser formado por operação simétrica, são chamados planos de uma forma e denotamos por (h, k, l). Nesse caso, o ferro (estrutura cúbica com  $a = b = c$ ), por exemplo um de plano equivalente compreendendo 24 tipos de planos tais como (211), (121) ...  $(\bar{2}11)$  ..., são denotados por (211), (onde  $\bar{2}$  significa - 2). Em medida de tensão residual de ferro e aço é freqüentemente o caso que o plano de (211) é usado. Como exemplo podemos citar:- Assim, considerando a primeira ordem de difração ( $n = 1$ ), para um dado  $\lambda$  e d analisados, o pico de difração apresentará um valor específico. Desta forma, a medida da posição do pico de difração será uma avaliação indireta do espaçamento interplanar do cristal. Por exemplo, para os planos (211) do ferro ( $d_{211} = 1,1702 \text{ \AA}$ ) e radiação  $K\alpha$  do cromo ( $\lambda = 2,2909092 \text{ \AA}$ ) a posição do pico de difração seria  $2\theta = 156,39^\circ$ .

A determinação da tensão residual é feita através da avaliação de d segundo várias orientações na amostra analisada. A figura 4.7 mostra esquematicamente a posição do tubo de raios-x e do detector em relação à superfície de uma amostra policristalina.

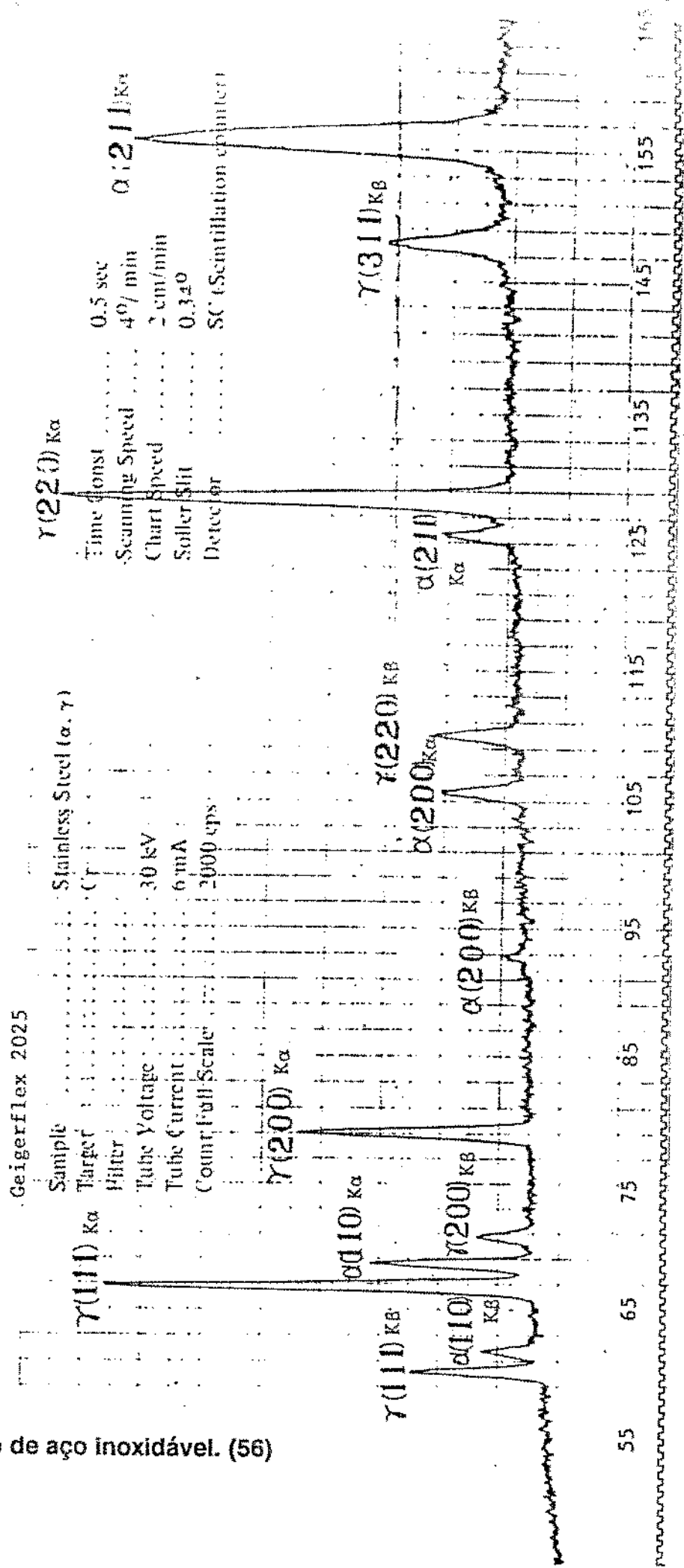
Na figura 4.2 o cristal rodeado por linhas grossas é chamado unidade de célula. Quando um número de tal unidade celular é combinado um com o outro, eles

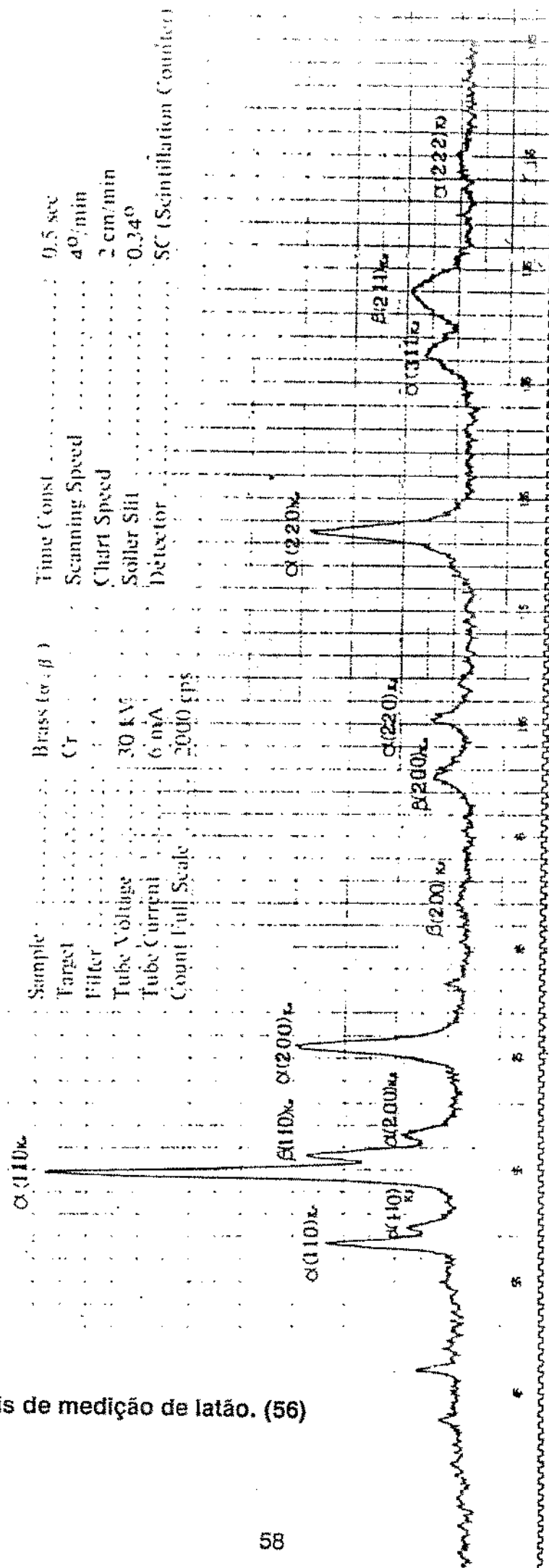
formam um único grão de cristal e mais ainda quando este estado é chamado de assentamento policristalino.

A maioria dos materiais metálicos em uso prático mantém este estado (unitário de cristal).

As figuras número 4.3 a número 4.5 de exemplos de medição são perfis de difração de materiais metálicos em uso. O exemplo de medição figura 4.6 é uma fotografia de um pico destes que aparecem nestas figuras. O tamanho dos grãos de cristal dos metais em uso é consideravelmente pequeno comparado com as áreas irradiadas pelos raios-x. Isto é real, porque o número de grãos de cristal numa área de irradiação é quase infinito, os raios difratados de cada grão de cristal formam um cone com o feixe de raios incidentes ao centro e o ápice, assim como o ponto de irradiação. Uma intersecção entre este cone e um plano (ex. plano perpendicular ao eixo) é chamado de anel de Debeye. No caso do número de grãos de cristal na área de irradiação ser pequeno e os grãos se encontrarem em estado bruto como aqueles de materiais fundidos, o anel não é contínuo, mas sim descontínuo (ponteado). Esses pontos são chamados pontos de Lane. Em medidas usando a difração de raio-x, não é desejável a existência de um anel descontínuo.

Fig. 4.3 - Perfis de medição de aço inoxidável. (56)





**Fig. 4.4 - Perfis de medição de latão. (56)**

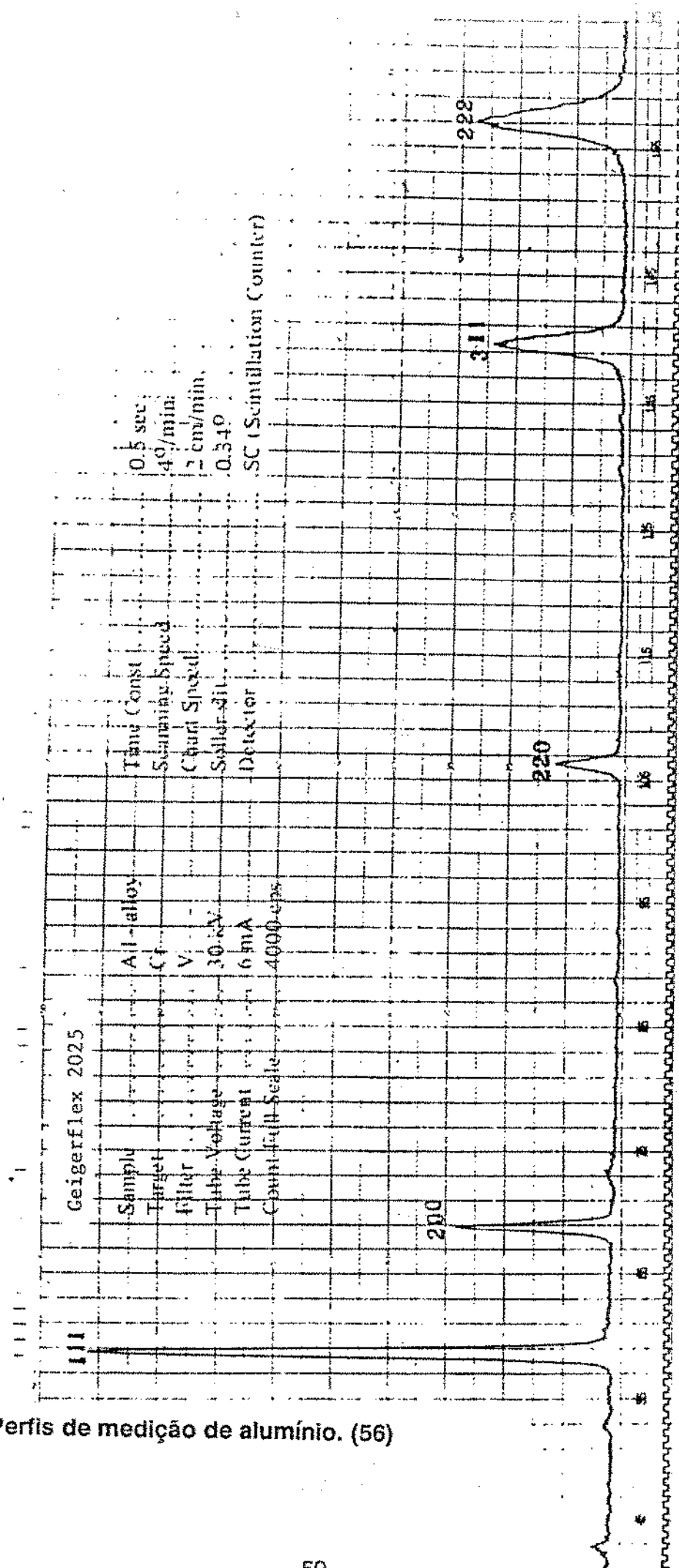


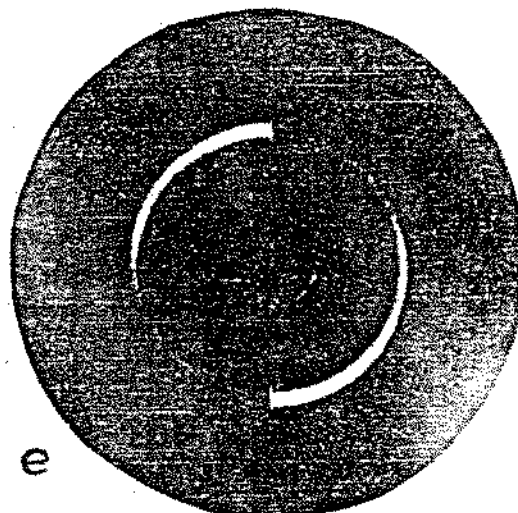
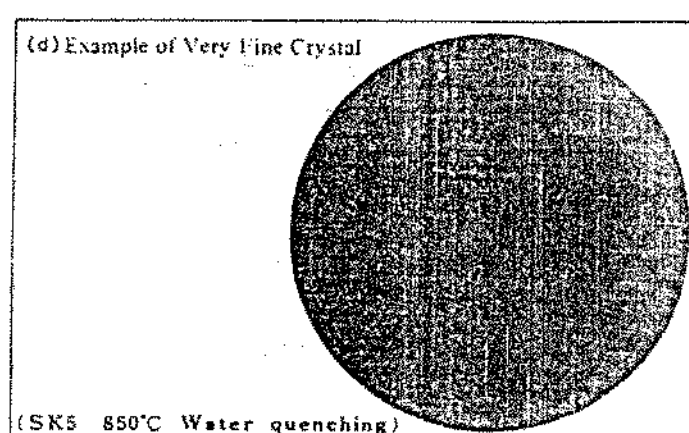
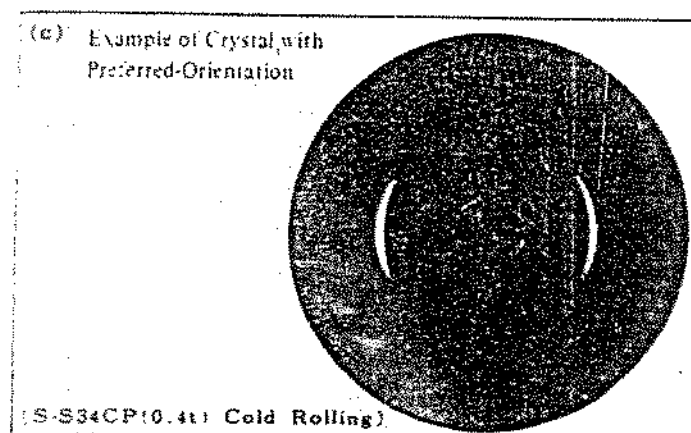
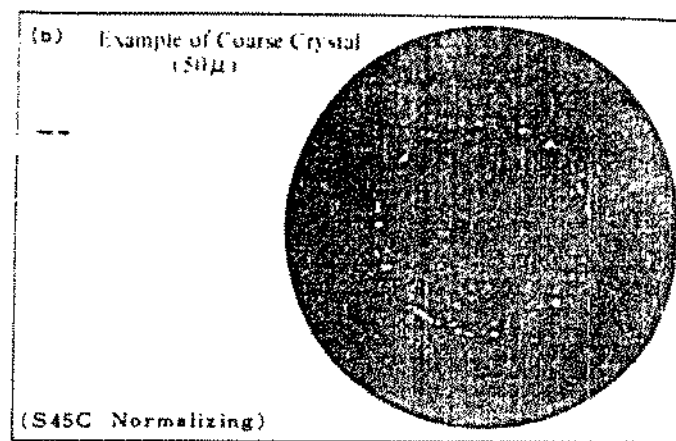
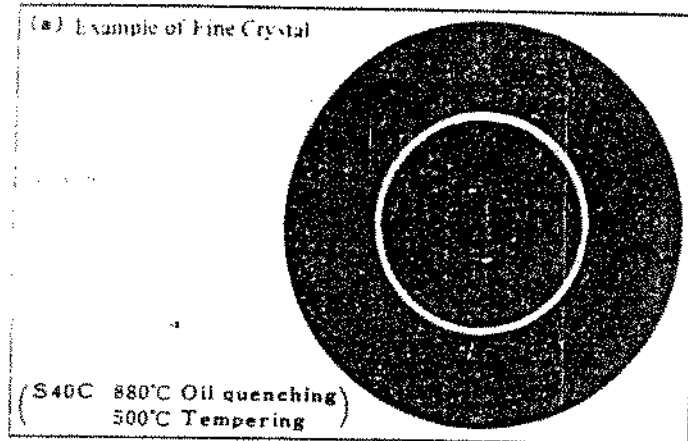
Fig. 4.5 - Perfis de medição de alumínio. (56)

Measuring Equipment  
Target  
Diffraction Plane  
Tube Voltage, Current

Staindex  
Cr K $\alpha$  V filter  
(211)  
25kV 6mA

Slit  
Distance between sample and film  
Film  
Exposure Time

1.0 collimator  
20 mm  
Non-screen type  
5 minutes



e

Schaal Method

Fig. 4.6 - Fotografia de um Pico que aparece nos perfis da amostra mostrados nas figuras anteriores. (4.3, 4.4, 4.5)

Fotos dos anéis da coleção de Debeye. (56)



A figura 4.3 é um exemplo de medida obtido por avanço do contador em velocidade constante do centro mostrado em exemplo de medição da figura 4.6 em direção ao raio (referido como varredura). Isto significa que os raios-x difratados aparecem formando vários cones de diferentes ápices com o feixe de raios-x incidente como centro.

## 4.2.2 - Métodos mais utilizados

### 4.2.2.1 - Método convencional

A figura 4.7a mostra o grupo A pertencendo a um plano do reticulado (h, k, l) através do aumento da secção de corte do metal.

Embora o feixe de raios-x seja indicado por uma única linha, na verdade áreas são irradiadas muitas vezes de maneira tão ampla quanto cada cristal. Grãos de cristal que satisfazem a condição de difração na figura 4.1 são mostradas sobre o grupo A. A figura 4.8b mostra o estado no qual a amostra foi girada ao redor da posição de irradiação, enquanto a direção do feixe de raios-x incidente é mantida como está na figura 4.7a.

Onde:  $\psi_0$  = ângulo entre o feixe incidente e a normal (N) à superfície da amostra.

$\psi$  = ângulo entre o feixe incidente e a normal aos planos cristalinos que difratam.

$$\psi = \psi_0 \pm \eta \quad (4.2)$$

$$\eta = 90 - \theta \quad (4.2)$$

Durante uma medida (figura 4.7a), o tubo de raio-X é fixo de tal maneira que os raios-X são direcionados para a mostra a um ângulo, enquanto o detetor se move de modo a medir a intensidade dos raios-X difratados. É observado também que a direção da tensão medida é a direção da linha projetada do raio-X incidente com relação ao plano da amostra. A figura 4.8c apresenta padrões de difração para  $\psi_0 = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  e  $45^\circ$ , obtidos através de saída de um registrador. O equipamento Strainflex é dotado também de um processador que armazena essas informações, determina as posições dos picos de difração, o coeficiente angular, e através de uma impressora sai com o

resultado de tensão residual além de vários outros parâmetros correlatos. A figura 4.8d ilustra um resultado típico de medida em uma peça sob tensão residual de compressão.

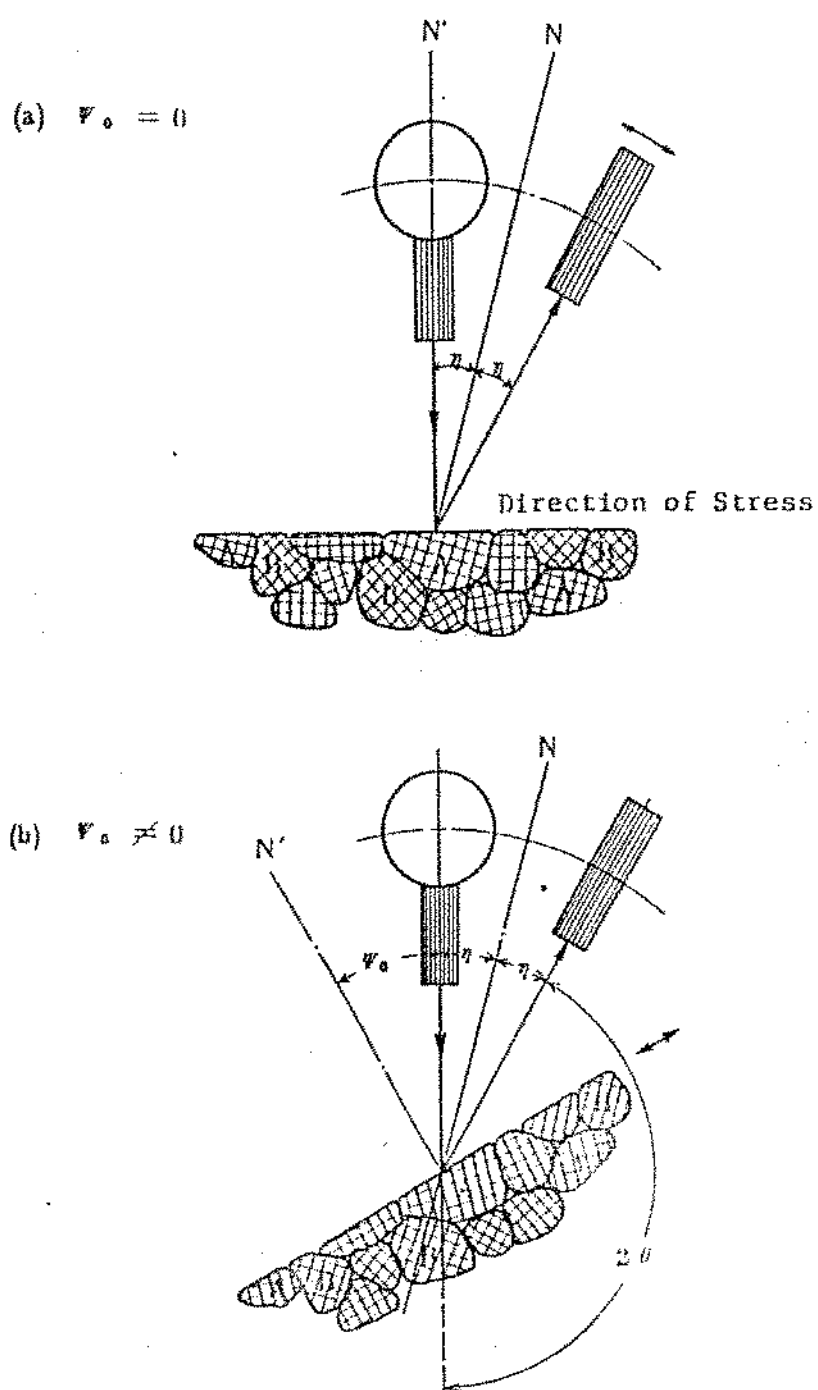


Fig. 4.7 - Iso- Inclination Method (Método comum). (56)

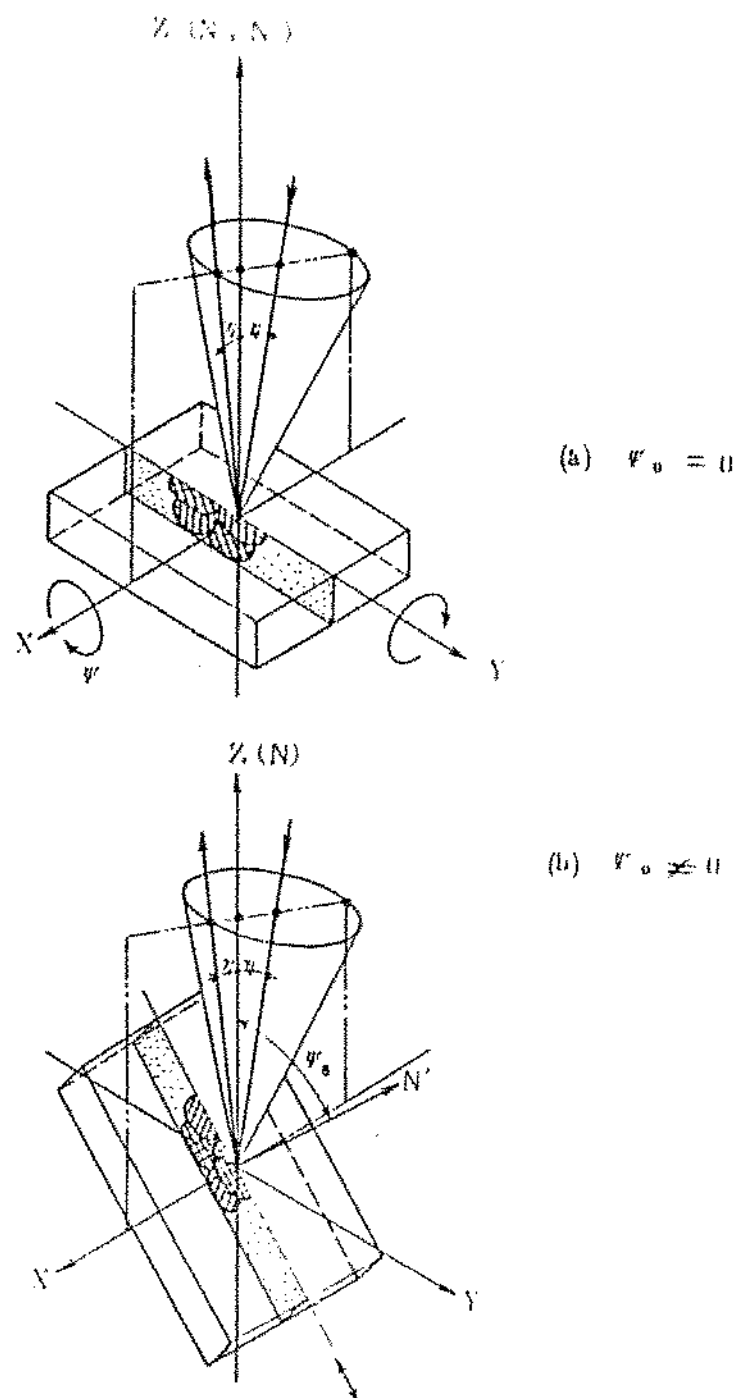


Fig. 4.8 - Método da inclinação lateral. (Side Inclination Method). (56)

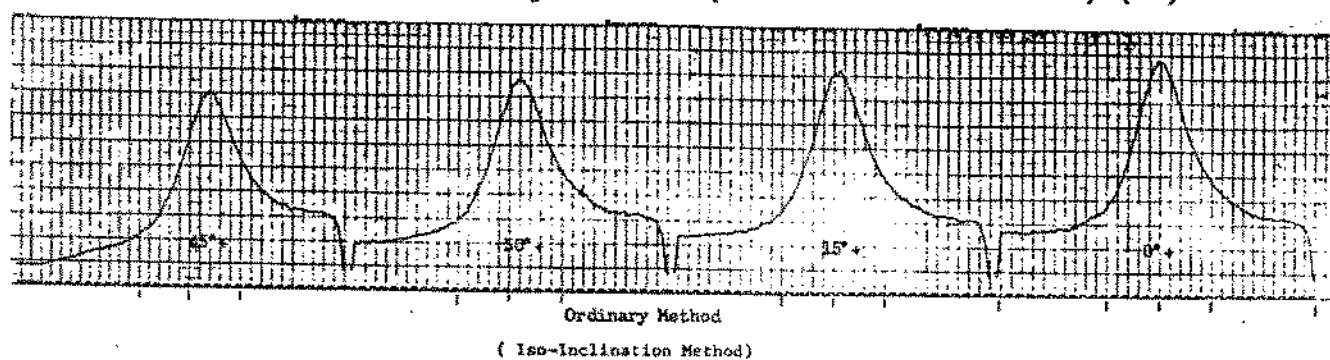


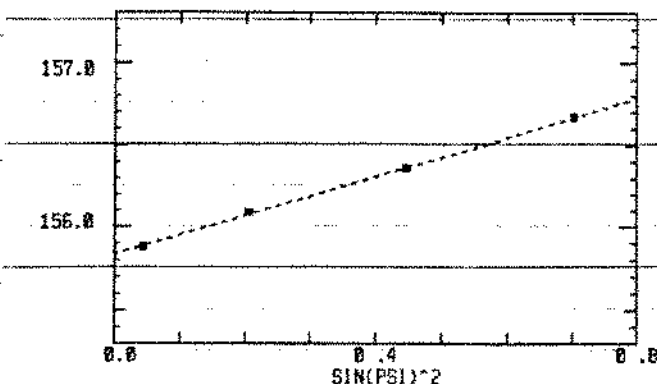
Figura 4.8c - Exemplo de medida de tensão residual superficial

\*\*\* PRELIMINARY CONDITION \*\*\*

File name : UNI25G  
 Sample name : Cilindro  
 Measurement system : Ordinary  
 X-ray incident angle (Psi: DR Psi0) : Psi0(fixed Psi0)  
 2Theta angle (No stress) : 156.08  
 Stress constant (negative) : -297.23  
 Soller slit (DS) : 1  
 Soller slit (RS) : 1  
 Height limit (mm) : 2  
 Target : Cr  
 X-ray (1--Kalpha 2--Kbeta) : 1  
 Voltage (kV) : 30  
 Current (mA) : 10  
 Full scale (graphic) : 15000  
 2Theta high angle (deg.) : 170.0  
 2Theta low angle (deg.) : 140.0  
 2Theta step width (deg.) : 0.65  
 Fixed time (sec.) : 0.9  
 Comment :  
 Operator :

Psi: DR Psi0 angle : 0 15 30 45

82-13-1989  
 2THETA (deg) [ Center of FWHM ]  
 -354.54 +- 8.06 Mpa  
 cilindro



\*\*\* Results of peak search \*\*\*

PSI0 OR PSI1 ANGLE(deg): 0.00  
 PEAK POSITION (deg): 155.87  
 F.W.H.M. (deg): 5.41  
 PEAK INTENSITY : 2737  
 INTEGRATED INTENSITY : 24196

INTEGRAL BREADTH (deg): 5.75

INTEGRAL BREADTH (deg): 5.85

PSI0 OR PSI1 ANGLE(deg): 15.00  
 PEAK POSITION (deg): 156.06  
 F.W.H.M. (deg): 5.76  
 PEAK INTENSITY : 2664  
 INTEGRATED INTENSITY : 22577  
 INTEGRAL BREADTH (deg): 5.51

STRESS CONSTANT : -297.23  
 SLOPE : 0.94155  
 STRESS VALUE : -285.60  
 RELIABILITY (+): 14.92

DATA ANALYSIS

02-13-1993

PSI0 OR PSI1 ANGLE(deg): 30.00  
 PEAK POSITION (deg): 156.31  
 F.W.H.M. (deg): 5.02  
 PEAK INTENSITY : 2490  
 INTEGRATED INTENSITY : 20657  
 INTEGRAL BREADTH (deg): 5.39

MEASUREMENT MODE : SC-1sp, Fixed Psi0 (psi0)  
 DATA FILE NAME : Data file 1 Data file 2 Data file 3  
 UNI25G  
 START STOP ANGLE : [Start] 140.00 [Stop] 170.00  
 FULL SCALE : 15000 [ 0: File read >0: Common full scale ]  
 SMOOTHING : 0 [ 0 / 5-25 odd ]  
 BACK GROUND STEPS : [Low] 3 [High] 3  
 LP CORRECTION : 1 [ 0: No 1. Filter 2. Incident mono. 3. Counter mono. ]  
 MONOCHRO. 2thetaM : 0  
 ABSORPTION COEF : 0.00 [ 1/cm : 0: No correction ]  
 PEAK 2THETA : 156.08  
 YOUNG (Mpa) : 205800  
 POISSON'S RATIO : .28  
 STRESS CONST. (Mpa): -297.21

PSI0 OR PSI1 ANGLE(deg): 45.00  
 PEAK POSITION (deg): 156.50  
 F.W.H.M. (deg): 4.79  
 PEAK INTENSITY : 2038  
 INTEGRATED INTENSITY : 18354

FILE NAME	PSI	C.-FWHM	C.-GRAV.	PEAK TOP	MAX. INT.	FWHM	INTEG.	INTEG.W
UNI25G0	11.96	155.878	156.441	155.800	5729	5.434	35285	6.159
UNI25G15	26.96	156.091	156.638	155.975	4985	5.307	30075	6.033
UNI25G30	41.96	156.363	156.966	156.319	3791	5.148	22564	5.952
UNI25G45	56.96	156.672	157.050	156.581	2122	4.959	13094	6.170

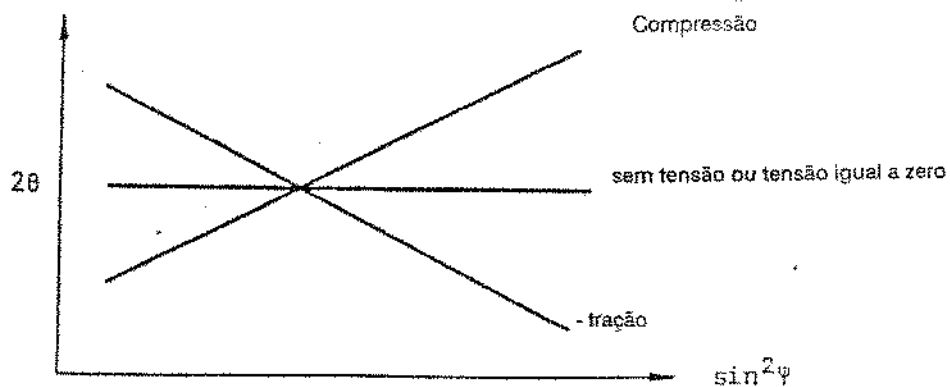
\* RESULTS OF STRESS ANALYSIS \*

PEAK POSITION : CENTER OF FWHM  
 STRESS = -354.54 Mpa  
 1 SIGMA RELIABILITY = +- 8.06 Mpa  
 SLOPE = 1.1929 deg  
 2 THETA ANGLE (AT PSI=0) = 155.834 deg

Figura 4.8d- Exemplo de resultado de tensão residual usando o equipamento Strainflex da Rigaku. Área irradiada diâmetro 8 mm. Radiação Cr-K $\alpha$ . Plano de difração: (211) Fe

Os grãos de cristal difratados pelos planos (h, k, l), são agora repostos pelo grupo B, o qual vem satisfazer a condição de difração. Desta maneira, no caso de um material policristalino (como é o caso do nosso material em estudo), é possível relacionar grãos de cristal para difração por variação do ângulo de incidência do raio-x.

Se a tensão é aplicada em paralelo à superfície da amostra, a força aplicada agirá nos planos do cristal situado no grupo A e B em diferentes ângulos, respectivamente porque a força é um vetor. De acordo com o espaçamento interplanar  $d$ , vai variar com a mudança de ângulo feito pelo plano da amostra e o plano do reticulado. Se o espaçamento interplanar  $d$  é medido a cada ângulo incidente  $\psi_0$  e então  $2\theta$  é visto em gráfico com respeito ao  $\sin^2\psi$ , como uma distribuição a qual tende a descer em direção a direita será obtida, como mostrou a fig. 4.7



**Fig. 4.9 - Mostra a variação angular  $2\theta$  versus  $\sin^2\psi$ . (56)**

Nota-se no mínimo que duas exposições (2 valores de  $\psi_0$ ) são necessárias para a medida de tensão residual (método da dupla exposição). Entretanto, ao aumentar o número de exposições (método de  $\sin^2\psi$ ), torna-se possível medir com maior precisão o valor do coeficiente angular ( $\partial 2\theta / \partial \sin^2\psi$ ) através de regressão linear. O processador do Strainflex realiza esses cálculos automaticamente.

#### **4.2.2.2 - Método de Inclinação Lateral (método de Schulz)**

Este é outro método desenvolvido por Wolfstieg (53) através do uso do método Schulz de reflexão (um dos métodos de medição para várias formas que através da difratometria examina a orientação dos cristais). Ex. medidas de tensão residual em dentes de engrenagens.

Os princípios cristalográficos são os mesmos segundo Sachs (54), mas comparados com o método de inclinação comum como mostra a figura 4.7, ele é diferente.

Significa que, medindo-se o ângulo de Bragg dos raios-x difratados saindo em uma direção em ângulos retos para aquele em que o caso do método comum, é possível se medir o espaçamento interplanar dos grãos cristalinos em uma direção para qual o feixe de raio-x incidente é inclinado. A direção da tensão medida é mostrada na figura 4.9. Neste caso temos  $2\theta$  versus  $\sin^2\psi$  (seu diagrama é obtido na base de  $\psi = \psi_0$  (fig.4.9). Então,  $\psi$  é o ângulo de inclinação da amostra formado pela normal  $N'$  da superfície da mesma e o plano de espalhamento ou dispersão (um plano que inclui o eixo do feixe de raios-x incidentes e o eixo d raios-x difratados. Este plano invariavelmente inclui a normal  $N'$  da estrutura reticular.

Na figura 4.8 o MSF faz a rotação do ângulo  $\psi$  de tal maneira que a posição da amostra girada no sentido anti-horário em redor do eixo Y por  $\eta$  (a posição na qual o ângulo incidente é zero), corresponde a  $\psi_0 = 0$ . Quando  $\psi_0 = 0$ , contudo não há diferença a se considerar, quer o ângulo incidente seja igual a 0 ou  $\eta$ . Como resultado, o método de inclinação lateral apresenta o seguinte:-

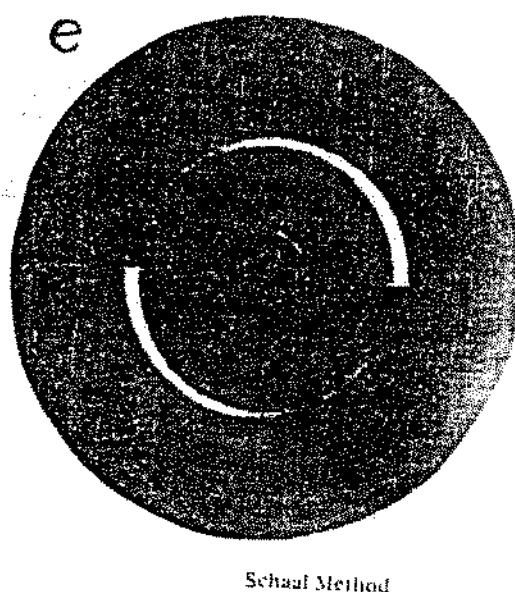
- a-) O ângulo incidente  $\psi$  pode variar aproximadamente até a direção paralela ao plano da amostra.
- b-) Não há perigo do objeto em medição vir na direção dos raios difratados.
- c-) A mudança do ângulo incidente não necessita de correções por absorção desde que o efeito da absorção da amostra nos raios difratados sejam sempre mantidos constantes.

Um exemplo de medição pelo método de inclinação lateral é mostrado em medição (fig.4.8).

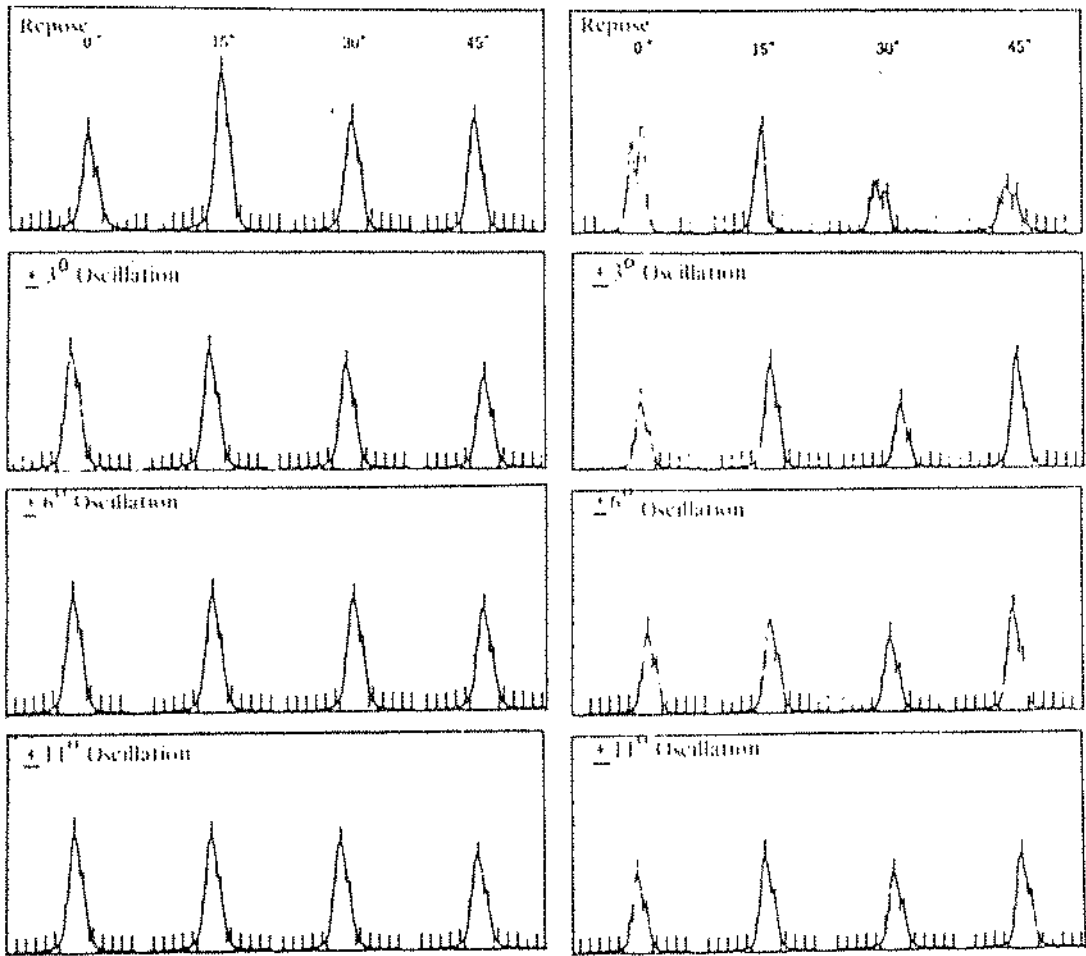
#### 4.2.2.3 - Método da Oscilação do ângulo incidente de raios-x.

Este método é aplicado tanto para fundidos, forjados, soldas, etc. Tais materiais apresentam grandes tamanhos de grãos resultando em pontos Laue que como

mostrados em dados suplementares (fig. 4.10). É almejado aumentar o número de grãos de cristal que podem contribuir para difração por condução de oscilação tanto quanto  $\Delta \psi$ , centralizando em redor do ângulo incidente de forma que os raios difratados possam ser obtidos também de grão de cristais ligeiramente diferentes (55). A oscilação é dividida entre o eixo X de oscilação e o eixo Y de oscilação correspondendo a direção do raio e a direção circunferencial do anel de Debeye. A oscilação do eixo X é muito efetiva e o seu desempenho é mostrado na fig. 4.11. A metade superior ilustra anéis de Debeye, resultantes do estado estacionário, enquanto a metade inferior mostra aqueles causados por oscilação de  $\pm 5^\circ$ .

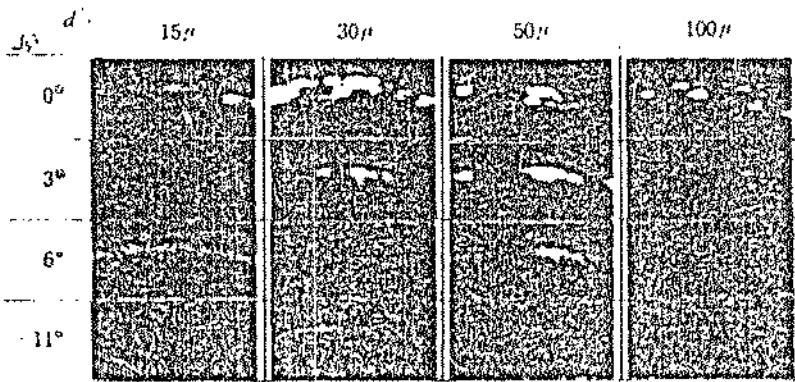


**Fig. 4.10 - Foto dos anéis de coleção de Debeye. (56)**



variação do raio difratado de uma amostra com cristal bruto por oscilação de raios X incidente  
irradiação em amostra de grão de cristal com 30  $\mu$ s em dimensão de 4 x 6 mm<sup>2</sup>

variação do raio difratado de uma amostra com cristal bruto por oscilação de raios X incidente  
irradiação em amostra de grão de cristal com 100  $\mu$ s em dimensão de 4 x 10 mm<sup>2</sup>



d: dimensão do grão do raio-X incidente  
 $\theta$ : Ângulo oscilante do raio-X

Variação de difrações padrão por oscilação de raio-X incidente

Fig. 4.11- Dados de Oscilação. (56)



Agora quando a intensidade de difração dos raios-x difratado obtida de alguns grãos de cristal é denotada por  $I(2\theta, \psi)$ , esta intensidade é dada por:-

$$I(2\theta, \psi) = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_g I_g(2\theta, \psi) dt \quad (4.5)$$

onde  $g$  é a soma dos grãos de cristal que contribuem para a difração por oscilação do ângulo de incidência, e  $T$  é a constante de tempo fixado. Quando um ciclo de oscilação é denotado por  $\tau$ ,  $T$  é dado por  $T = n\tau$ . Obviamente  $\Delta t$  cai em  $-\tau/2 \leq \Delta t \leq \tau/2$ .

Portanto:-

$$I(2\theta, \psi) = \frac{n}{T} \int_0^T \sum_g I_g(2\theta, \psi) dt + \frac{1}{T} \int_0^{\Delta t} \sum_g I_g(2\theta, \psi) dt \quad (4.6)$$

O segundo termo mostra imperfeição de oscilação. Oscilação é para ser feita de tal forma que o segundo termo de (4.6) seja desprezível comparado com o 1º termo. Para o propósito os dois modos seguintes podem ser concebidos.

- a. Tornar  $N$  excessivamente grande
- b. Fazer  $\Delta t$  tender para zero

A forma a é o método convencional no qual a oscilação tem que ser tão rápida quanto possível.

Contudo, a imperfeição ainda permanece. No caso b o 2º termo é zero para permitir oscilação perfeita. Quando  $\Delta t = 0$  e  $n = 1$  e  $t = \tau$  é obtido. De acordo, desconsiderando o 2º termo pode ser realizado por selecionar um ciclo de oscilação como tempo fixo (56).

#### 4.2.2.4 - Método do $\psi$ fixo

Este método é para manipular o contador e o goniômetro de forma a manter sempre o mesmo plano de difração durante o processo de obtenção de perfis de raios difratados, como mostrados na figura 4.12..

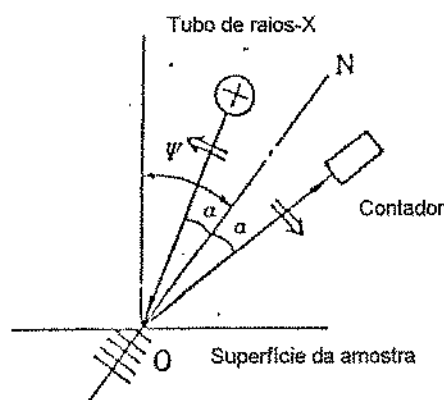


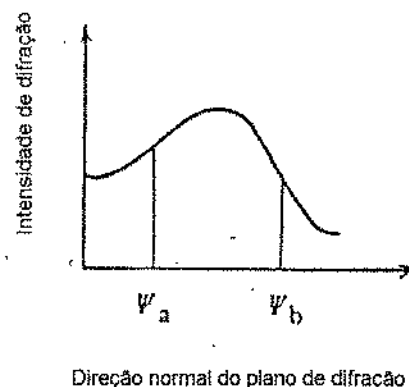
Fig. 4.12 - Método do ângulo  $\psi$  fixo.

A medição é executada tendo-se o ângulo ( $\alpha$ ) formado pela direção do contador raio incidente, e a direção do contador permanece a mesma para que a direção normal (ON) do plano de difração da amostra possa sempre satisfazer os requisitos da difração. Desde que o ângulo  $\psi$  feito pela direção normal do plano da amostra e aquele do plano de difração seja mantido constante. Neste caso, o método de medição é chamado de método  $\psi$  fixo (9).

Este método é idêntico a  $\theta - 2\theta$  modo "scan" usado em sistema raio-x com difratômetro e tem as seguintes vantagens sobre o método de  $\psi$  fixo. (um método de varredura através do contador sozinho (dele próprio), mantendo-se o ângulo de incidência constante (56).

##### a) Medição de materiais que possuem textura.

Nesse caso a intensidade de difração vai variar amplamente se a incidência do raio-x for variada. Um exemplo abaixo é mostrado (fig. 4.13).



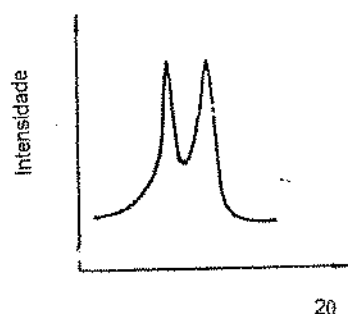
**Fig. 4.13 - Medição de materiais que possuem textura**

A razão porque tal distribuição ocorre é que a distribuição dos planos de difração não é uniforme. No caso do método  $\psi_0$  fixo onde o ângulo de incidência é fixado na direção normal ao plano de difração, move-se com o movimento do contador. Como resultado, quando um perfil de difração é obtido, o número dos planos que contribuem para difração diferenciadora com respeito ao valor  $2\theta$ . Por essa razão, na região perto de  $\psi_a$  a posição de difração em pico é observada no lado do ângulo inferior com respeito a verdadeira posição de difração. Inversamente na região perto de  $\psi_b$  é observado ao lado do ângulo superior (mais alto).

No caso do método  $\psi$  fixo o número dos planos de difração que contribuem para difração é mantido constante com respeito ao valor  $2\theta$ . Portanto, a posição do pico de difração pode ser observada exatamente na verdadeira posição de difração sendo afetada pela textura.

**b-) Medição de materiais que possuem grãos de cristais brutos.**

Quando os grãos de cristais brutos estão em contacto enquanto estão sendo ligeiramente inclinado, pode ocorrer um caso que a posição do pico não possa ser determinada devido a uma ruptura no perfil de difração como ilustra a figura abaixo (fig. 4.14.).



**Fig. 4.14 - Medição de materiais que possuem cristais brutos**

No caso do método comum do  $\psi_0$  fixo tal ocorrência não pode acontecer por causa de contribuições para difração por diferentes grãos de cristal contra variações de  $2\theta$ .

No caso do método do  $\psi$  fixo tal não ocorre desde que os mesmos planos de difração contribuam para difração todas as vezes no tempo todo. Este método é também efetivo para lidar com a influência de cristais brutos. Com a "Strainflex" o efeito é equivalente ao que resulta de  $\pm 4^\circ$  de oscilação. Acidentalmente o "Strainflex" permite operação confluyente, convergente para o método de  $\psi$  fixo e o método de oscilação.

#### **4.2.2.5 - Exemplo de medida:-**

Neste trabalho, usamos o método de Inclinação igual ou método comum (usado para medir amostra plana ou praticamente plana como é de nosso estudo. Ou seja, como já mencionamos, o corpo de prova tem a forma cilíndrica compacta (sem furos). Neste caso, é recomendada para que seja obtido uma melhor precisão de medidas, que se faça uma "janela" na superfície a ser medida. A dimensão dessa janela deve ser tal que a superfície então na forma cilíndrica se transforma praticamente em forma plana, na qual a dispersão é mínima em relação a da medida executada sem essa precaução.(fig.5.1)

A geração atual da Strainflex permite a obtenção de medida, de tensões residuais superficiais de modo não precisar de processamento cálculos. Ela, além de executá-los, também faz a correção dos mesmos através de seu sistema operacional altamente computadorizado. Em função disso, não apresentaremos cálculos compátveis, e sim a análise dos resultados indicados em tabelas e gráficos no cap.6.

## **5. - EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E METODOLOGIA**

### **5.1 - Equipamentos**

- Máquina Franho: onde o corpo de prova foi previamente e devidamente serrado de barras cujas dimensões são de 2 1/2" x 3000mm.

- Torno - horizontal - convencional - Romi - usado na pré usinagem.

- Torno - CNC Cosmos 30 (cv) - Romi - O qual foi utilizado na propagação dos corpos de prova em operações na forma de acabamento, os quais posteriormente foram submetidos ao tratamento térmico de têmpera seguido de revenido.

- Rugosímetro - Surfrest 211 - Mitutoyo - Utilizado para medir o valor da rugosidade (Ra, Rz e R<sub>máx</sub>)

- RETÍFICA CILÍNDRICA CONVENCIONAL - Usada na preparação dos corpos de prova em operações de acabamento.

- MÁQUINAS DE MEDIDAS POR COORDENADAS:-

MICROVAL - BROWN & SHARPE - Usada para medir a circularidade e cilindridade.

- BANCO METALOGRÁFICO: NEOPHOT - 32 -

CARL ZEISS - Usado na execução da fotomicrografia da estrutura cristalinas dos corpos de prova.

- STRAINFLEX MSF-2M - Rigaku - Máquina de raios-x usada para medir as tensões residuais de superfície e da subsuperfície através da difração dos raios-x.

### **5.2 - Materiais**

#### **5.2.1 - Utilizados na operação de torneamento na forma de acabamento.**

a) Inserto cerâmico SNGH 120412T1020 -

- CC650 (Sandvik), cuja composição constituída do óxido de alumínio + carboneto de titânio ( $Al_2O_3 + TiC$ ).

b) Porta inserto CSRNL 2525M12 (DIFER) observando a geometria e a dimensão do inserto estão de acordo com a norma ISO 1832/1985.

Enquanto que o porta inserto está de acordo com a especificação ISO 5608/1980 (CSRNL 2525M12 - DIFER)

A geometria final após a sua montagem é:-

ângulo de saída  $\gamma_o = -6^\circ$

ângulo de folga  $\alpha_o = 6^\circ$

ângulo de inclinação  $\lambda_s = -5^\circ$

ângulo de posição -  $\chi = 75^\circ$

raio de ponta 'r  $\mathcal{E} = 1,2 \text{ mm}$

#### **5.2.2 - Utilizados na operação de retificação na forma de acabamento.**

- Rebolos A 80 L 5 V 10 W - cuja composição é de óxido de alumínio + carboneto de silício ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ )

#### **5.2.3 - Ataque químico**

Foi usado o ácido nítrico + uréia na proporção de 15% e 1% em 100 ml de água respectivamente.

#### **5.2.4 - Corpo de prova**

Na execução dos ensaios deste trabalho utilizou-se de apenas um tipo de material, ou seja, aço ABNT52100. Os corpos de prova com forma cilíndrica, foram pré usinados a partir do material adquirido em barras ( $\phi 2 \frac{1}{2} \times 3\text{m}$ ), laminadas e recozidas.

Suas dimensões podem ser observadas conforme a figura 5.1. Onde L significa a área onde foi realizada a usinagem. Esse mesmo L corresponde também a largura do abrasivo usado na retificação (20 mm).

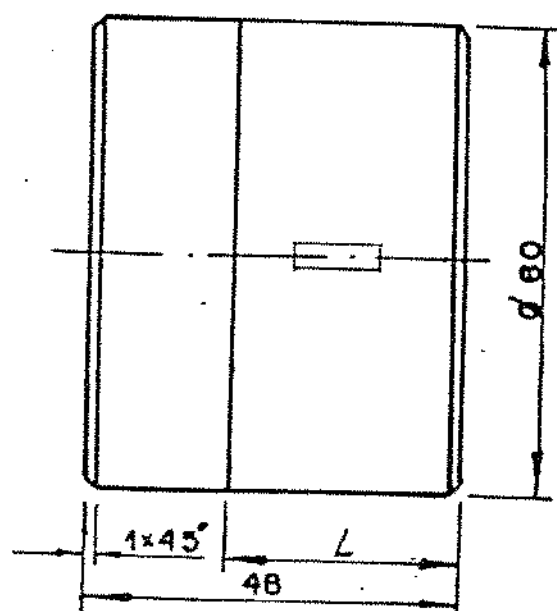


Fig. 5.1 - Corpo de Prova (unidade em mm)

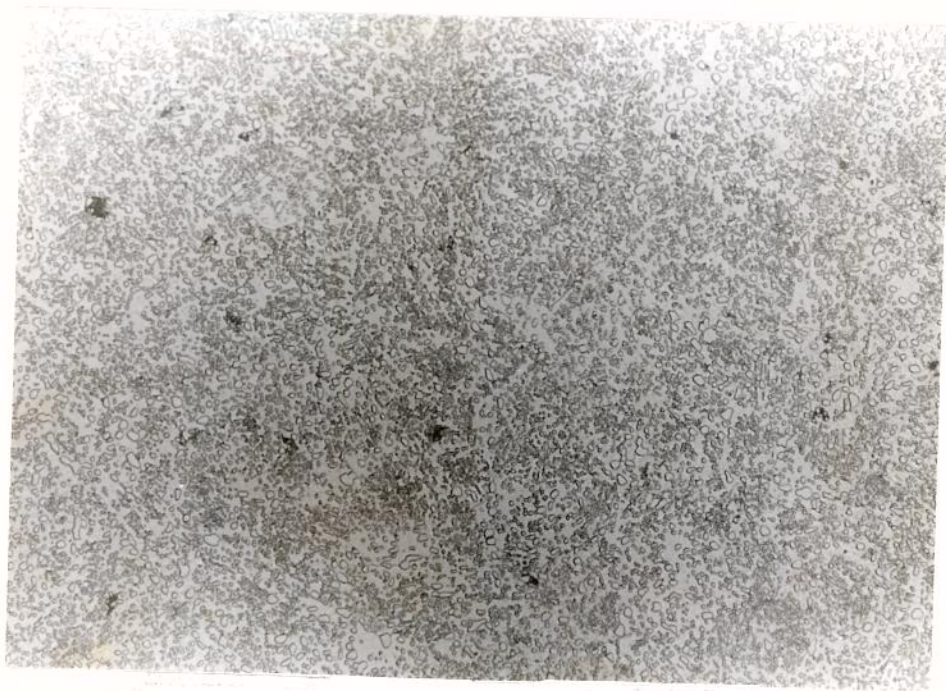
#### 5.2.4.1 - Composição química do corpo de prova

1,030%C; 0,230% Si; 0,350% Mn; 1,400% Cr; 0,110% Mo; 0,006% V; 0,013 P;  
0,12% S; 0,050% Cu; 0,016% Al; 0,015 W e 0,011% Co;

A microestrutura do corpo de prova recozido e tratado termicamente está representada pelas fotomicrografias das figuras 5.2 e 5.3 repectivamente.



**Fig. 5.2 - Aço ABNT 52100 recozido (ampliado 800 vezes)**



**Fig. 5.3 - Aço ABNT 52100 temperado e revenido (ampliado 800 vezes)**



5.3 - Metodologia do experimento

Na fig. 5.4, temos uma visão geral da seqüência do estudo .

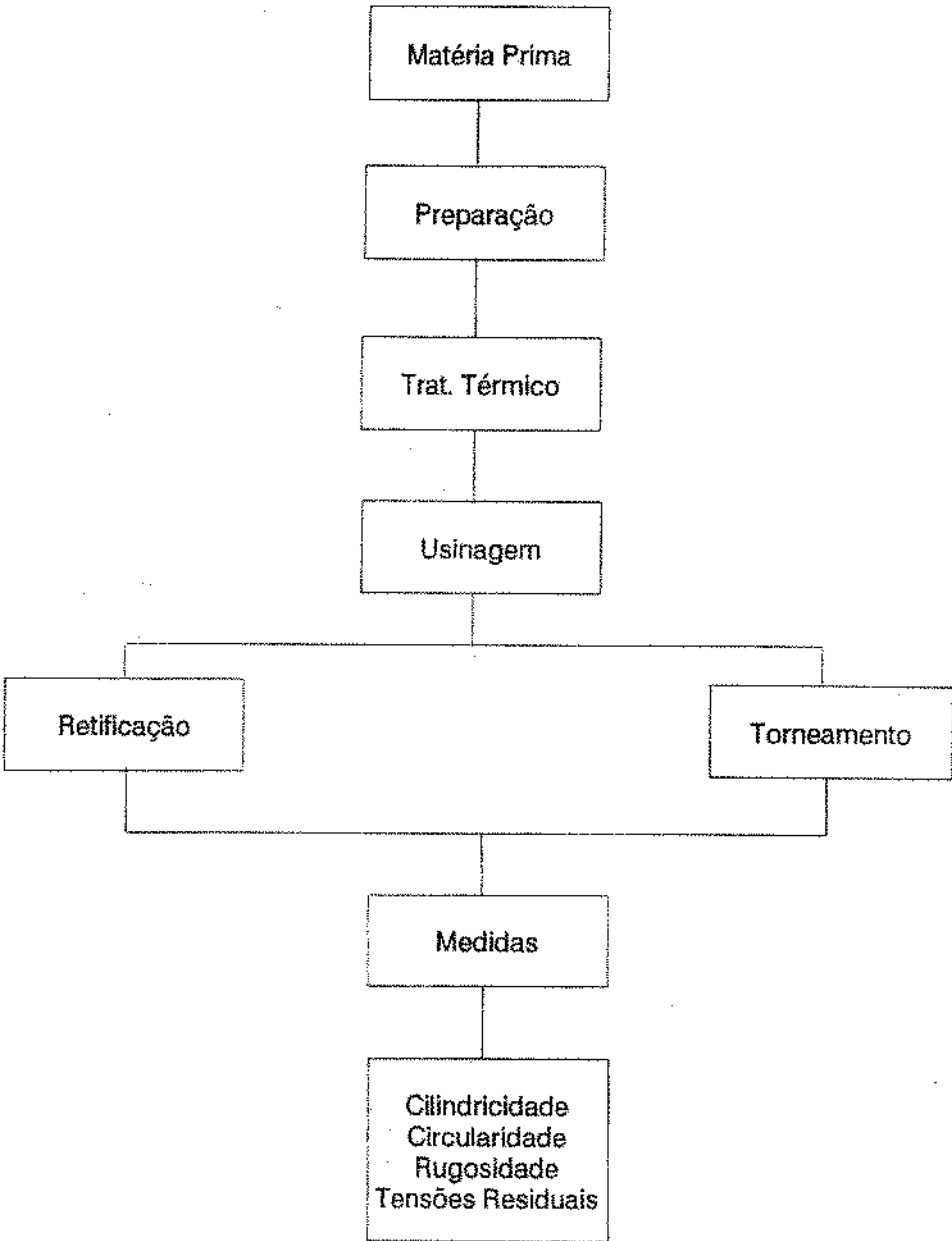


Fig. 5.4 - Visão geral do experimento.

### 5.3.1 - Preparação dos corpos de prova

#### 5.3.1.1 - Corte, pré usinagem e tratamento térmico

a) Os corpos de provas foram obtidas de barras cilíndricas recozidas ( $\phi 2 \frac{1}{2}$ " x 3000 mm. da seguinte seqüência:-

a1 - serramento na dimensão de  $2 \frac{1}{2}$ " x 52 mm

a2 - torneamento em desbaste através de duas passadas, com  $ap = 1,75$  mm, usando ferramenta de metal duro. Em seguida faceamento, furos de centro e chanfros.

a3 - Tratamentos térmicos (têmperas seguidas de revenimento). Condições:-

- Pré aquecimento a  $400^{\circ}\text{C}$  durante 2 horas (duras horas) e aquecimento final a  $870^{\circ}\text{C}$  durante 1 hora (uma hora). O meio de têmpera foi constituído de uma solução aquosa/ polimérica a 3%, ocorrendo a mesma com a agitação do corpo de prova. Enquanto que o revenimento ocorreu numa temperatura de  $200^{\circ}\text{C}$  durante 2 horas, onde notamos que a dureza obtida na superfície (em torno de 60 Rc), sofre variação a partir da profundidade de 6,35mm. Ou seja, ela começa a entrar em declínio a partir dessa profundidade. Portanto, a dureza da superfície praticamente é a mesma até esse limite. (mesmo após a usinagem).

Após a realização de tratamento térmico escolhem-se ao acaso três corpos de provas com durezas médias de 60/61, 64/66 e 60/62 Rc respectivamente e foram medidas as tensões residuais de superfície e da subsuperfície (tab. 5.1)

HRc	0 $\mu\text{m}$	25 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$
1 (60/61)	- 553	- 512	- 445	- 400
2 (64/66)	- 602	- 409	- 388	- 392
3 (60/62)	- 585	- 538	- 469	- 372
$\bar{x}$	- 580	- 486	- 434	- 388

Tabela 5.1 - Valores médios de tensões residuais, em MPa, superficiais e subsuperficiais em função da dureza em RC (antes de usinagem)

### 5.3.1.2 - Condições de usinagem

#### a) Operação de torneamento

Velocidade de corte ( $V_c$ ) = 100m/min

Profundidade de corte ( $a_p$ ) = 0,5mm

Avanço ( $f$ ) = 0,08; 0,12 e 0,20mm/revolução sem uso de refrigeração

Os corpos de prova em número de nove, foram divididos em três grupos com três unidades. Foram mantidas as  $V_c$  e  $a_p$  e variando-se o avanço em cada grupo, conseqüentemente obtendo-se condições distintas.

Cada corpo-de-prova foi usinado em apenas uma passada com profundidade ( $a_p$ ) = 0,5mm. Sendo usada uma aresta para cada unidade.

#### b) Operação de Retificação

As condições de usinagem aqui utilizadas foram as seguintes:-

Velocidade de corte ( $V_s$ ) = 30m/s

Revolução da peça ( $W_w$ ) = 150 rpm

Profundidade do corte ( $a$ ) = 0,2; 0,12 e 0,08 mm

Fluido de corte - óleo solúvel 1:20

O agrupamento dos corpos de prova foi feito de maneira idêntica aos do torneamento, ou seja, foram usinados em três condições, apenas com a variação da profundidade de corte ( $a$ ).

Convém ressaltar que, antes da retificação de cada peça, o rebolo foi dressado. Essas condições foram determinadas com o objetivo de obter-se rugosidades semelhantes as obtidas na operação de torneamento.

### 5.3.1.3 - Medidas Realizadas

a) Rugosidade superficial:- a medição da rugosidade superficial foi realizada fundamentando-se em três parâmetros:  $R_a$  (desvio médio aritmético),  $R_{max}$  (altura

máximas das irregularidades) e Rz (média de cinco pontos da altura das irregularidades). Conforme norma DIN ISO 1302 e NRB 6405.

b) No que concerne ao gradiente de dureza superficial, praticamente não ocorreu variações significativas, pois a profundidade de corte foi de 0,5 mm. A operação foi feita em apenas uma passada.

c) Desvios de circularidade e cilindricidade.

Em função de tais medidas representarem desvios importantes, que influenciam no contexto da qualidade do produto, as mesmas foram realizadas.

d) Testes para verificar ocorrência de queima.

Foram realizados tanto para as peças retificadas como para as torneadas.

De acordo com a seguinte sequência:

1.1 - Limpar o colo na área crítica, de modo que todo o óleo, graxa e sujeira sejam removidas.

Utilizar tricloreto, esfregando com algodão e, em seguida, secar.

1.2 - Aplicar a solução nº 1 (Ácido Nítrico 4%) nas áreas críticas, esfregando com algodão, até que toda a superfície esteja completamente preta ou cinza escuro. O tempo de ataque pode variar de 15 segundos a 2 minutos.

1.3 - Lavar com água quente, para remover o ácido.

1.4 - Secar com ar comprimido.

1.5 - Lavar com água.

1.6 - Secar com ar comprimido.

1.7 - Aplicar a solução nº 2 (Ácido Clorídrico 2%) nas áreas previamente atacadas, esfregando com algodão para remover a película escura, formada pelo primeiro ataque. O tempo de ataque pode variar de 15 a 60 segundos.

1.8 - Lavar com água quente, para remover o ácido.

1.9 - Lavar a região atacada com solução nº 3 (Hidróxido de Amônia a 2%) para completa neutralização do ácido, usado no ataque.

1.10 - Lavar com água.

1.11 - Secar com ar comprimido.

1.12 - Se não houver queima de retífica, a superfície atacada deve ter uma cor cinza-claro. Quaisquer riscos ou áreas mais escuras que o fundo cinza-claro são evidências de queima de retífica. Quaisquer áreas mais claras (brilhantes) que o fundo cinza-claro são evidências de aço que foi retemperado por excessivo aquecimento gerado pela retífica.

e) Tensões residuais de superfície e subsuperfície

Foram realizadas através da máquina de raios-x Stringflex da Rigaku.

Condições:-

Método comum ou  $\text{sen}^2\psi$  ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $45^\circ$ )-

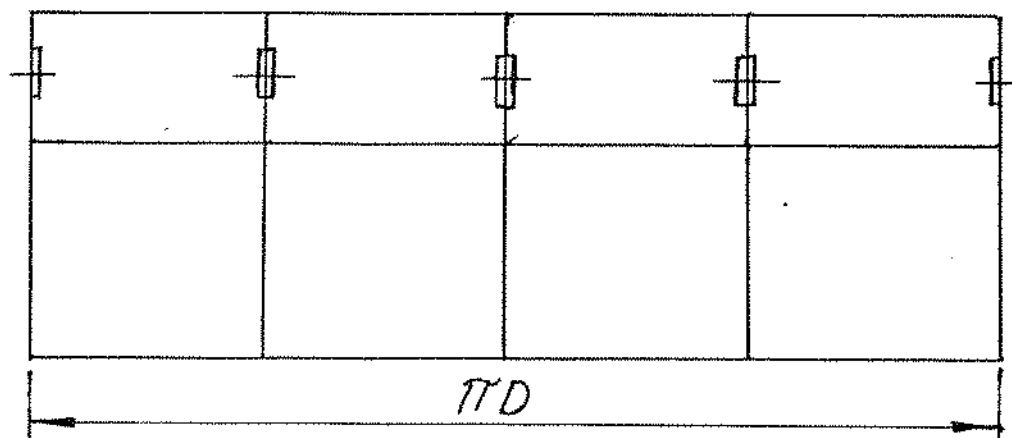
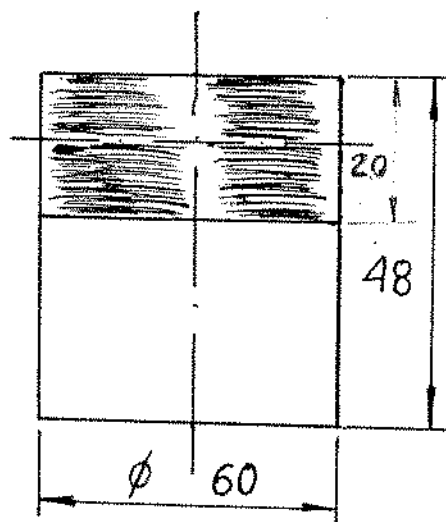
Área irradiada  $2\text{mm} \times 10\text{mm} = 20\text{mm}^2$ ,

Feixe paralelo Cr  $K\alpha$ , filtro Vanádio

Direção de medida tangencial (para todos corpos de prova) fig.5.5

A direção de medida é tangencial para todos os corpos de prova. De acordo com a figura 5.5, tem-se a superfície usinada, cuja largura é de 20 milímetros (mm), na qual foram realizados as medidas através da difração do raio-X. A superfície usinada é representada de maneira sombreada. É nessa região que foram feitas "janelas" de 2mm x 10mm, afim de proporcionar uma melhor localização e conseqüente precisão de medida.

Para a realização da medida na subsuperfície foi necessário fazer um ataque químico a base de 15% de Ácido nítrico + 1% de uréia em 100ml de Água. Constatam-se que para a retirada de 25  $\mu\text{m}$  de material, foi preciso corpo de prova ficar submerso durante aproximadamente 7 minutos, para 50  $\mu\text{m}$  mais 7 minutos e para 100  $\mu\text{m}$  mais 14 minutos. No total gastaram-se 28 minutos por peça.



**Figura 5.5 - Posicionamento para Medidas com raios-X na direção tangencial.**  
( unidade em mm )

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com os pontos de vista inseridos na literatura e os referentes ao nosso trabalho, obtivemos os seguintes resultados:

HRC	0 $\mu\text{m}$	25 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$
1 (60/61)	- 553	- 512	- 445	- 400
2 (64/66)	- 602	- 409	- 388	- 392
3 (60/62)	- 585	- 538	- 469	- 372
x	- 580	- 486	- 434	- 388

Tabela 6.1 - Valores médios de tensões residuais, em MPa, superficiais e subsuperficiais em função da dureza em RC (antes da usinagem)

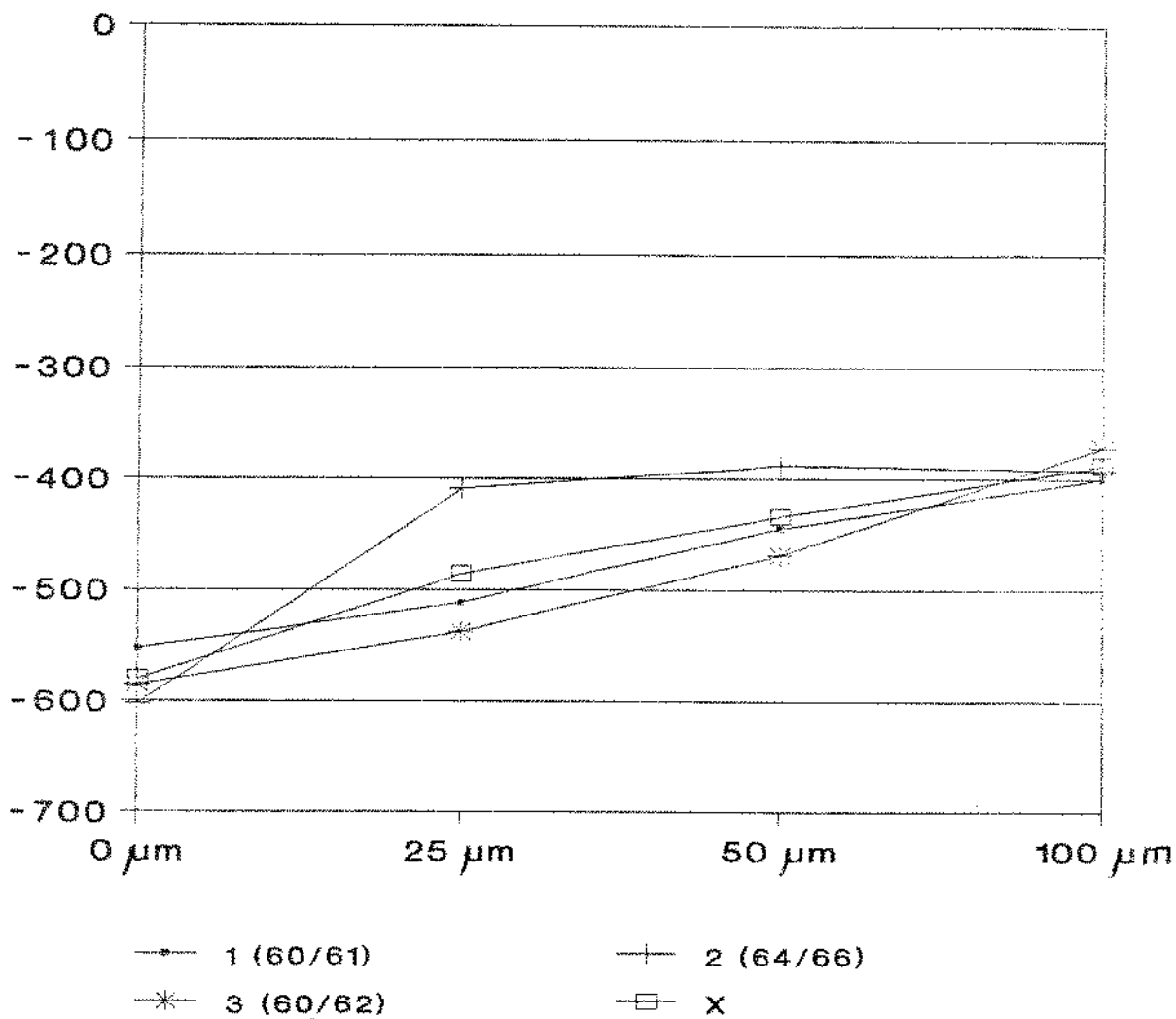


Figura 6.1 - Valores médios de tensões residuais, em MPa, superficiais e subsuperficiais em função da dureza em RC (antes da usinagem)

Ra $\mu\text{m}$	Superfície	25 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$
0,7 - 1	- 481	- 528	- 529	- 545
0,3 - 0,7	- 425	- 379	- 351	- 376
0,15 - 0,3	- 631	- 363	- 341	- 345

Tabela 6.2 - Valores médios de tensões residuais superficiais e subsuperficiais após retificação em MPa.

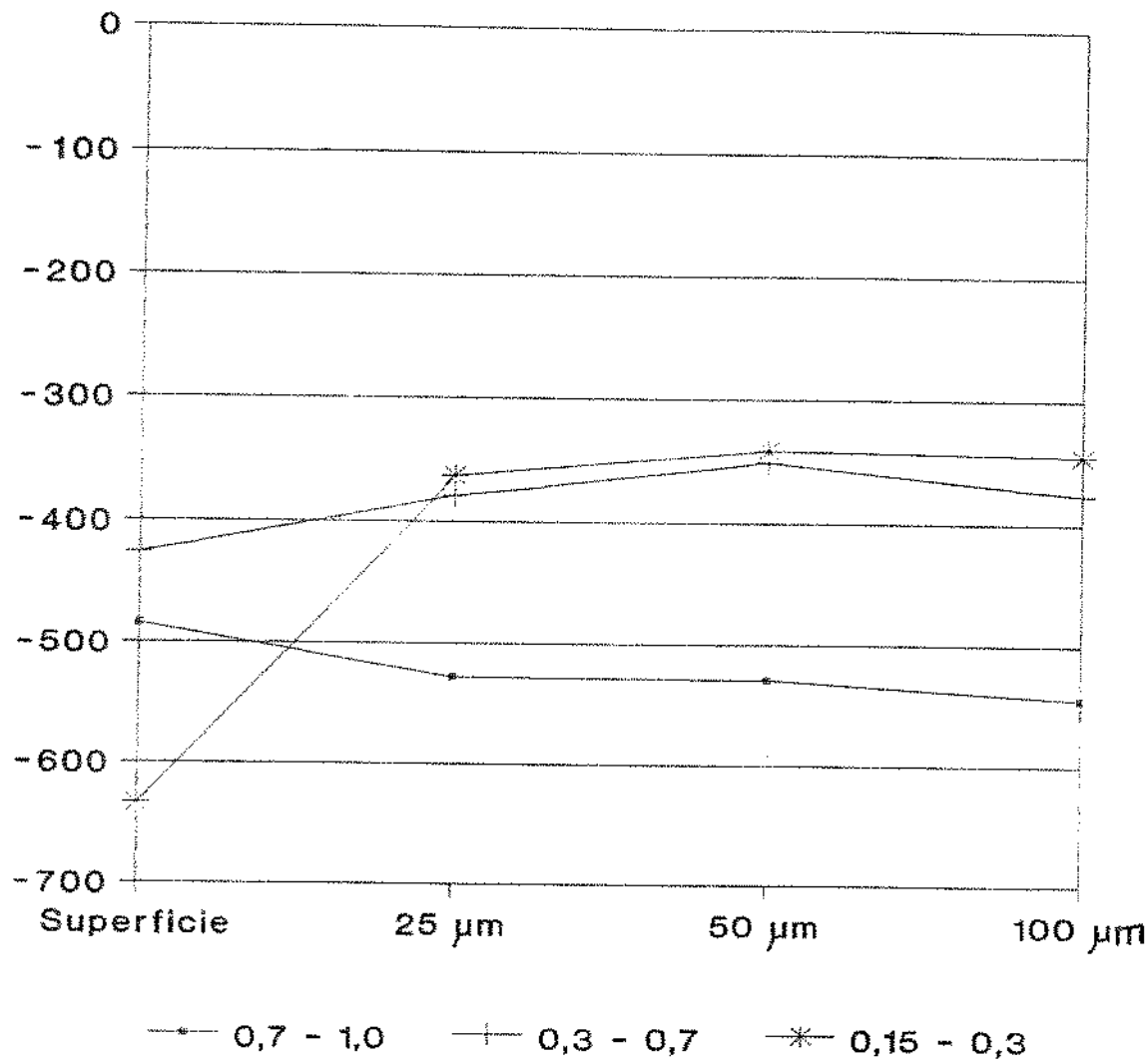


Figura 6.2 - Valores médios de tensões residuais superficiais e subsuperficiais após retificação em MPa.



Ra mm	Superfície	25 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$
0,9 - 1,1	- 700	- 416	- 366	- 337
0,5 - 0,9	- 282	- 320	- 319	- 303
0,25 - 0,5	- 207	- 356	- 320	- 307

Tabela 6.3 - Valores médios de tensões residuais superficiais e subsuperficiais após torneamento em MPa.

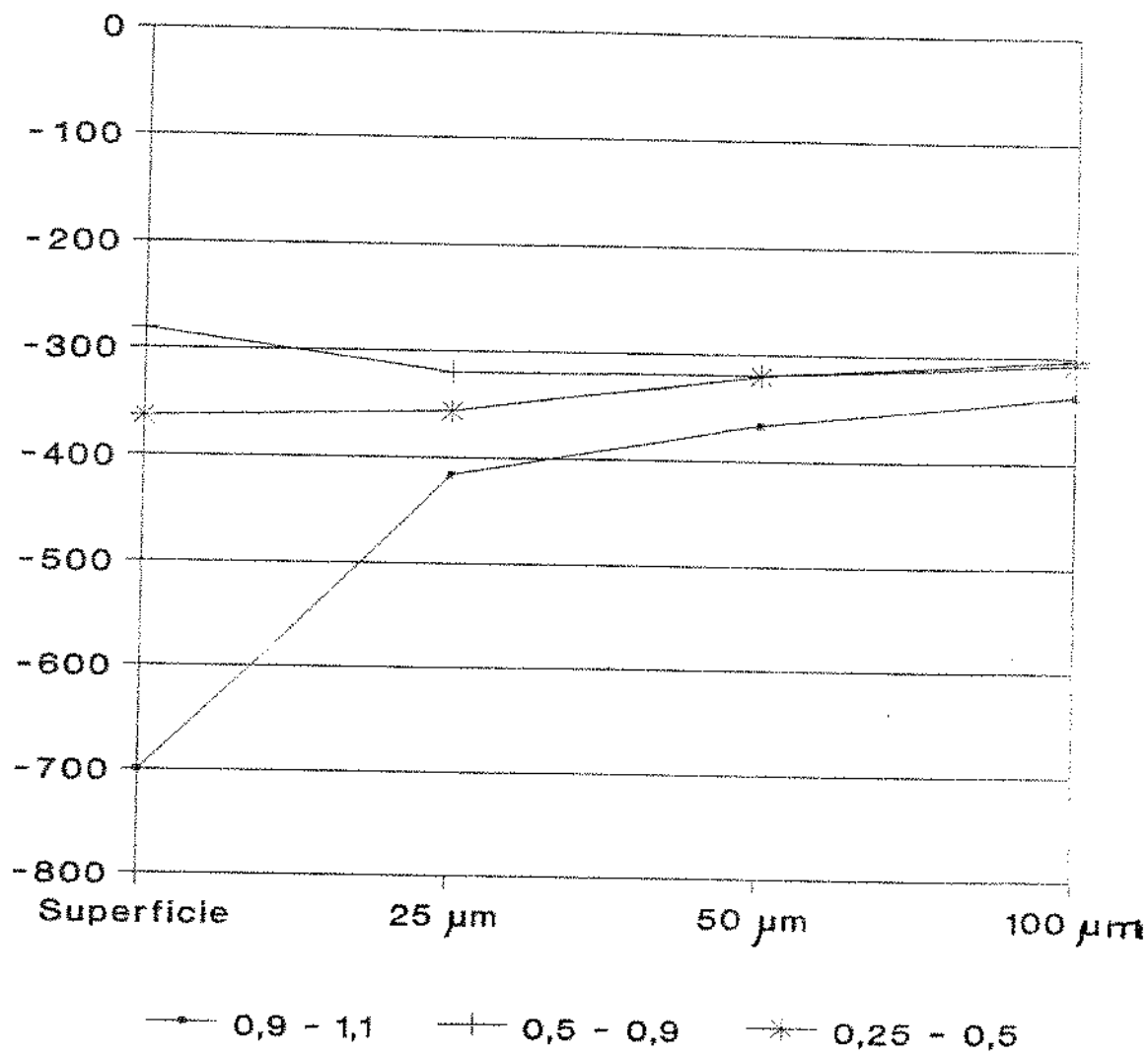


Figura 6.3 - Valores médios de tensões residuais superficiais e subsuperficiais após torneamento em MPa.

HRC	Ra $\mu$ m	Superf.	25 $\mu$ m	50 $\mu$ m	100 $\mu$ m
61/62	.93	- 476	- 544	- 535	- 564
61/62	.72	- 452	- 440	- 451	- 470
61/62	.68	- 514	- 600	- 600	- 600
61/62	.63	- 385	- 278	- 215	- 278
60	.40	- 462	- 427	- 428	- 420
59/60	.38	- 429	- 432	- 411	- 430
59	.28	- 475	- 207	- 195	- 174
60/63	.21	- 691	- 423	- 377	- 384
62/63	.17	- 727	- 460	- 450	- 478

**Tabela 6.4 - Valores médios de tensões residuais em MPa para operação de retificação**

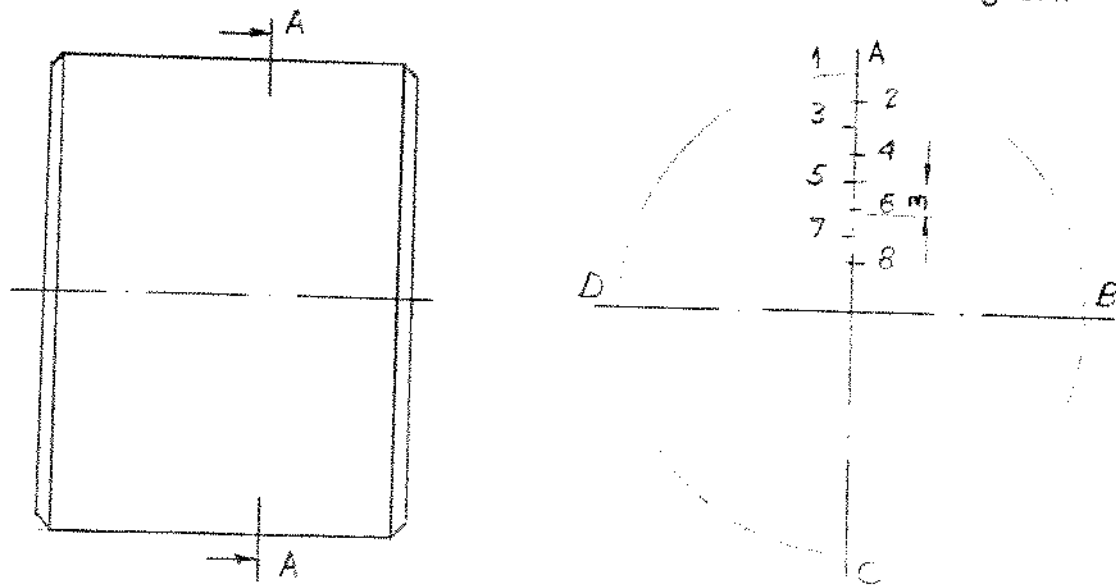
63	1.05	- 856	- 372	- 294	- 275
62/63	.96	- 702	- 425	- 422	- 389
59/61	.93	- 539	- 451	- 381	- 348
59/60	.54	- 313	- 359	- 336	- 303
62	.53	- 315	- 434	- 432	- 414
58/59	.51	- 217	- 166	- 188	- 193
64/65	.32	- 225	- 356	- 296	- 289
63	.32	- 215	- 365	- 312	- 288
62/63	.28	- 190	- 347	- 353	- 345

**Tabela 6.5 - Valores médios de tensões residuais em MPa para operação de torneamento**

	HRC	Ra $\mu\text{m}$	Rz $\mu\text{m}$	R <sub>máx</sub> $\mu\text{m}$	Tensão Residual Superficial em MPa.	Média	Tensão Residual Subsuperficial em MPa.			Média	Obs
							25 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$		
R E T I F I C A Ç Ã O	61/62	.68	4.30	4.80	- 512		- 610	- 611	- 594	- 600	
					- 486	- 514	- 620	- 633	- 617	- 600	
					- 546		- 566	- 557	- 593	- 600	
	61/62	.72	4.50	4.90	- 463		- 472	- 436	- 464	- 440	
					- 429	- 453	- 440	- 404	- 476	- 451	
					- 464		- 409	- 517	- 470	- 470	
	61/62	.93	5.80	7.10	- 398		- 551	- 482	- 571	- 544	
					- 516	- 515	- 549	- 584	- 535	- 535	
					- 514		- 533	- 539	- 585	- 564	
	61/62	.63	4.50	5.10	- 404		- 312	- 173	- 276	- 278	
					- 359	- 385	- 255	- 282	- 315	- 215	
					- 391		- 266	- 190	- 245	- 278	
	59/60	.38	2.90	3.60	- 307		- 498	- 437	- 387	- 363	
					- 410	- 437	- 370	- 403	- 437	- 411	
					- 431		- 462	- 393	- 467	- 430	
	60	.40	3.00	3.60	- 409		- 383	- 423	- 419	- 427	
					- 530	- 484	- 457	- 406	- 422	- 428	
					- 515		- 429	- 454	- 418	- 420	
	59	.28	2.10	2.70	- 440		- 208	- 193	- 141	- 207	
					- 500	- 475	- 223	- 187	- 203	- 195	
					- 483		- 191	- 205	- 178	- 174	
	62/63	.17	1.40	1.80	- 771		- 480	- 435	- 511	- 460	
					- 629	- 727	- 489	- 428	- 461	- 450	
					- 778		- 412	- 489	- 462	- 478	
	60/61	.21	1.60	2.20	- 686		- 422	- 335	- 367	- 423	
T O R N E A M E N T O					- 589	- 691	- 441	- 368	- 368	- 377	
					- 799		- 405	- 427	- 418	- 384	
	62/63	.96	4.00	5.15	- 660		- 438	- 448	- 370	- 423	
					- 732	- 702	- 443	- 430	- 384	- 422	
					- 715		- 393	- 387	- 412	- 389	
	59/61	.93	3.70	4.90	- 557		- 470	- 403	- 344	- 451	
					- 548	- 539	- 432	- 349	- 321	- 381	
					- 513		- 450	- 391	- 378	- 348	
	63	1.05	4.03	5.37	- 870		- 374	- 266	- 250	- 372	
					- 888	- 879	- 403	- 332	- 293	- 294	
					- 877		- 341	- 285	- 282	- 275	
	58/59	.51	2.23	3.20	- 151		- 167	- 171	- 185	- 166	
					- 206	- 195	- 192	- 206	- 185	- 188	
					- 228		- 138	- 186	- 207	- 193	
	62	.53	1.90	3.13	- 320		- 435	- 415	- 374	- 434	
					- 302	- 315	- 427	- 454	- 420	- 432	
					- 323		- 441	- 427	- 449	- 414	
	59/60	.54	2.20	3.08	- 329		- 346	- 341	- 312	- 359	
					- 309	- 313	- 371	- 315	- 298	- 336	
					- 302		- 359	- 351	- 300	- 303	
	62/63	.28	1.87	2.10	- 189		- 355	- 379	- 356	- 347	
					- 173	- 180	- 327	- 329	- 343	- 353	
					- 179		- 359	- 351	- 337	- 345	
	64/65	.32	2.18	2.57	- 214		- 296	- 234	- 352	- 346	
					- 223	- 224	- 355	- 341	- 273	- 296	
					- 235		- 388	- 315	- 241	- 289	
	63	.32	1.90	2.32	- 158		- 360	- 346	- 267	- 372	
					- 306	- 196	- 373	- 300	- 300	- 312	
					- 124		- 385	- 291	- 298	- 288	

Tab. 6.6 - Valores de tensões residuais de superfície e subsuperfície

Antes da execução da usinagem referente as operações de torneamento e retificação foram feitas medidas de dureza (Rc) e de tensões residuais superficiais e subsuperficiais. A maneira como a dureza foi obtida é mostrada na Fig. 6.4.



**Fig. 6.4 - Gradiente de dureza no sentido radial.**

A Fig.6.4 apresenta o gradiente de dureza realizado em corpo de prova típico. Nota-se que a dureza começa a variar de maneira sensível após a profundidade de  $1/8''$ . Este fato significa que a dureza obtida após a usinagem, manteve-se tomando-se como referência a dureza na superfície. Em função da profundidade de corte ser pequena (0,2; 0,12; 0,08 mm), não ocorreu praticamente variação do valor desta propriedade após a usinagem.

A obtenção das medidas de tensões residuais superficiais foram obtidas através do método comum ou método de  $\text{sen}^2\alpha$  ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $45^\circ$ ), com posicionamento dos raios-X na direção tangencial, conforme fig. 5.5 já mencionada. Cada "janela" examinada é varrida por raios-X quatro vezes conforme  $\text{sen}^2\alpha$ . Portanto cada valor de tensão obtido de acordo com a tabela 6 do anexo B é obtido através da difração. A máquina executa todos os cálculos pertinentes na obtenção da tensão residual, após leituras de quatro variações angulares.

Para se conseguir um nível de confiança satisfatório das medidas das tensões residuais, foram realizadas 900 medições.

As medidas de tensões residuais superficiais e subsuperficiais foram estudadas de maneira comparativa, levando-se em conta a rugosidade superficial média ( $R_a$ ).

Os corpos de prova utilizados foram agrupados em função dos parâmetros de usinagem utilizados e conseqüente rugosidade obtida. Assim os corpos de prova ensaiados no torneamento, com rugosidade média ( $R_a = .93$  e  $.96$  mm). Foram comparadas com os de retificação, com a rugosidade similar. Este é um fato relevante, pois a rugosidade superficial pode influir no valor das tensões residuais.

A obtenção da rugosidade superficial é apresentada em três parâmetros, a saber:

- a) Desvio médio aritmético ( $R_a$ )
- b) Altura máxima das irregularidades ( $R_{máx}$ )
- c) Média de cinco pontos das irregularidades ( $R_z$ )

Tais itens conforme normas da ABNT (NBR 6405) e DIN ISO 1302.

Em termos de rugosidade, dependendo de valores relativamente altos, por exemplo, os usados em desbaste, podem mascarar as medidas de tensões residuais superficiais obtidas em função da dispersão de raios-X ocorrer em maior intensidade.

Em se tratando de faixas de rugosidades obtidas em mecânica de precisão, normalmente não ocorre o fenômeno de dispersão de raios-X, que seja prejudicial obtendo-se então valores relativamente confiáveis de tensões residuais superficiais.

Além destas considerações referentes à dureza, a rugosidade e tensões residuais superficiais, as quais são praticamente a essência da pesquisa foram realizados estudos pertinentes aos superaquecimento ou queima e medidas de desvios (circularidade e cilindricidade). Tais desvios foram medidos simplesmente para enfatizar a sua importância em peças típicas.

A verificação da queima é de fundamental importância no contexto da integridade de superfície.

O superaquecimento ou queima praticamente não ocorre na usinagem envolvendo operações de torneamento em função de parâmetros e condições de usinagem via de regra quase sempre favoráveis. Enquanto que em usinagem que

envolva operações de retificação não se pode sempre dizer o mesmo, em função por exemplo de alta geração de calor que envolve o processo.

A queima resultante de um superaquecimento gera mudanças na estrutura cristalina, as quais ocasionam o aparecimento de tensões residuais superficiais de tração. De antemão, sabe-se que esse valor de tensões trativas dependendo de sua magnitude, colabora na diminuição da resistência à fadiga do material.

Na pesquisa em apreço, o exame químico citado anteriormente para a constatação de possíveis superaquecimentos nos corpos de prova, foi executado e não foi detectado a presença de queima.

No que concerne aos desvios de circularidade e cilindridade, os mesmos foram medidos e constatou-se que suas medidas estão dentro de uma tolerância compatível. Tanto circularidade como cilindridade têm seus desvios estabelecidos dentro de uma variação dimensional levando-se em conta as dimensões finais da peça. (Vide anexo A).

Mais precisamente, a tabela 6.6 possui as medidas de rugosidade superficial e tensões residuais superficiais e subsuperficiais na íntegra. É desta última que se extraíram os dados para apresentação nas tabelas 6.4 e 6.5.

Quanto à confiabilidade do processo, constatou-se ser muito boa em função da repetibilidade dos resultados obtidos nas medidas das tensões residuais superficiais e subsuperficiais, cujo valor do desvio padrão girou em torno de 5%.

De acordo com as considerações realizadas podemos constatar os seguintes fatos:

1. Ao analisar a tabela 6.2 e a figura 6.2, composta por resultados obtidos em corpos de provas não usinados mas apenas tratados termicamente (têmpera e revenido), constatou-se que a dureza influencia de maneira relativa os valores obtidos. Pode-se dizer com certa reserva, que quanto maior a dureza do material maior será a tensão residual superficial de compressão. Normalmente ao aplicar-se uma têmpera utilizando como meio uma solução aquosa/polimérica seguida de revenido constata-se tensões residuais superficiais e subsuperficiais de compressão. Constata-se também que na subsuperfície as tensões residuais de compressão diminuem. Tal ocorrência além de ser constatado em prática, é reafirmada pela literatura.

2. Nas tabelas 6.3 e 6.4 e as figuras 6.3 e 6.4 observa-se que os resultados das tensões obtidas na superfície, tanto das peças que sofreram as operações de retificação como das que foram submetidas ao torneamento, não apresentaram diferenças excessivamente significativas. Podemos com certa cautela afirmar o mesmo para os valores encontrados abaixo das superfícies em questão.

Nota-se um comportamento desejável nas peças retificadas; o valor da rugosidade diminui enquanto que a magnitude das tensões aumenta. Deveria acontecer o mesmo, com as peças submetidas ao torneamento. Isto não acontece. Uma diminuição dos valor das tensões é observada, quando a rugosidade superficial aumenta. Este fato é pouco desejável, pois objetiva com o torneamento a realização de uma operação de acabamento.

De maneira mais prática podemos dizer que:-

Os resultados, quando analisados de forma geral, permitem concluir sobre a viabilidade técnica da substituição de retificação por torneamento, pelo menos dentro do contexto dos ensaios realizados, pois tensões residuais de compressão foram encontradas em todas as amostras ensaiadas apesar de apresentarem magnitudes variadas.

O método de medida de tensões residuais através de raios-X, deve ser aplicado com os seguintes procedimentos:-

a) Trabalhar com amostragem significativa de medidas e corpos de provas, para garantir uma consistência dos resultados, diante da heterogeneidade dos materiais policristalinos, dentre os quais encontram o material usado no presente trabalho.

b) Não permitir que fatores tais como oxidação da peça, procedimento de limpeza, entre outros, venham mascarar os resultados das tensões residuais introduzidas exclusivamente pela prática de retificação e torneamento.

Os resultados obtidos na prática, estão discriminados nas tabelas 6.1, 6.2, 6.3, figuras 6.1, 6.2 e 6.3 sendo que os resultados totais estão contidos nas tabelas 6.4, 6.5 e 6.6.

## 7. CONCLUSÕES

De maneira geral a aplicação dos processos de tratamento térmico, de retificação e de torneamento sempre geraram tensões residuais finais compressivas, tanto na superfície com na subsuperfície. Este fato viabiliza tecnicamente a substituição da retificação por torneamento.

Quando a rugosidade tende para valores pequenos, as tensões residuais compressivas tendem a valores menores em magnitude para a operação de torneamento. Este fato revela um comportamento menos desejável, pois a rugosidade menor é um fato procurado nas operações de torneamento de precisão, muito mais do que operação de desbaste.

A técnica de medida das tensões residuais para mapeamento da integridade superficial pós usinagem, mostrou-se viável. Entretanto, a dispersão de resultados recomenda níveis de controle do teste suficientemente altos para prevenir a influência de fatores estranhos ao processo, como por exemplo a oxidação, e amostragem estatisticamente confiável para conferir confiabilidade nos resultados obtidos.



## 8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Analisar a viabilidade técnica e econômica da substituição da retificação pelo torneamento.

Analisar a viabilidade econômica, conforme item anterior para diferentes materiais de peças e de ferramentas, com diferentes processos de tratamento térmico.

Explorar melhor os parâmetros de torneamento (com variação das velocidades de cortes e profundidades de corte) na distribuição das tensões residuais após o processo.

Estudar o comportamento das tensões residuais após retificação e torneamento em camadas subsuperficiais de magnitude variando na faixa até 25  $\mu\text{m}$ .

## 9. BIBLIOGRAFIA

- 1 - SALJÉ, E.; MATSUO, T.; LINDSAY, R.P. "Transfer of grinding research data for different operation in grinding". In: Annals of the CIRP, 31/2, 1982. p. 519-527.
- 2 - KÖNIG, N. SHLEIFEN mit schleifscheiben. In: Fertigungsverfahren. Verlag Gmbh, VDI, 1980. V.2, cap. 6, 317 p. p. 103-208.
- 3 - HAHN, R.S. E LINDSAY, RP. The metal removal parameter. In: Principles of grinding Machinery: 33-39. August, 1971. Parte II.
- 4 - MICHELETTI, G.F. Lavorazione per abrasione rettification. In: Tecnologia Meccanica : il taglio dei metalli. 2ª ed. Torino, Unione Tipografico/Editrico torne-se, 1977. V.1, cap 11 449p. p. 321-357.
- 5 - PETERS, J. E AERENS, R. "Optimization procedure of three phase grinding eyeles of a série without intermediate dressing. In: Annals of the CIRP, 29/1, 1980. p.195-200.
- 6 - SCHWARZ, J. Precison grinding: tips on selecting the right wheel. Tooling e Production, 51 (2): 53-55, may 1985.
- 7 - CODING, B *et alii*. Recent reserch and development ni grinding. In: Annals of the CIRP, 21/2, 1972 p. 157-166
- 8 - PECHERER, E. & MALKIN, S. "Grinding of steels with cubic boron nitride (CBN). In: Annals of the CIRP, 33/1, 1984.
- 9 - TOOL grinding with CBN Manufacturing Engineering, 89 (6). Dec. 1982.
- 10- HAHN; RS & LIDSAY, R.P. The weel removal parameter. Principles of grinding Machinery: 33-39, September, 1971. parte III.
- 11- SHIBATA, J.; GOTO, T.; YAMAMOTO, M. Characteristics of air flow around a grinding wheel and their availability for assessing the wheel wear, Annal of the CIRP, 31/1, 1982. p. 233-238.
- 12 - LINDSAY, R.P. "The effect of contact time on forces, wheel wear rate and G-ratio during internal and external grinding. Annals of the CIRP, 33/1, 1984 p. 193-197.
- 13 - SAINI, D.P.; WAGNER, J.G.; Brow, R.H. Pratical significante of contact defection in grinding. Annals of the CIRP, 31/1, 1982. p.21J-219.
- 14 - HAHN, R.S. & LINDSAY, R.P.; The influence of process variables on material removal, surface integrity, surface finish and vibration in grinding. International Machine Tool Design an Reseach Conference , 10., September 1969. p.95-117.

- 15 - LEICHTER, S. A escolha de abrasivos favoráveis para a fabricação. tradução da firma Robert Bosh, Campinas. Technische Mitteilungen, 68 (7/8), July/August, 1975.
- 16 - OLIVEIRA, J.F.G de "Análise da ação do Macro efeito de Dressagem de Rebolos no Desenvolvimento do Processo de Retificação - Tese de Doutorado - 1988 - USP São Carlos.
- 17 - KÖNIG, W.; Kinger, M.; Link, R. "Machining Hard Material With Geometrically Cutting Edges - Field of Applications and Limitation". Annals of the CIRP, Vol.39/1/1991 - p. 61-64.
- 18 - NAKAYAMA, K.; ARAI, M. KANDA, T. "Machining Characteristics of Hard Material". Annals of the CIRP Vol. 37/1/1988 p. 89-92.
- 19 - VAN VLACK, L. H. "Propriedades dos materiais cerâmicos". tradução Cid Silvera e Shiroky Onita ed. Edgard Blücher - S.Paulo - 1973.
- 20 - EZUGWU, E. Q. E WALLBANK, J. Propriedades e Fabricação de Ferramentas cerâmicas" - Máquinas e metais - 04/1988 - p. 14-22.
- 21 - BRINKSMEIR, E. & BARTSCH, S. "Ceramic Cutting Tools Materials Characteristics and load typers Determine Wear Mechanisms". Annals of the CIRP, Vol. 37/1/1988 - p. 97-100.
- 22 - BOEHS, L. "Resultados Atraentes com Ferramentas cerâmicas". Máquinas e Metais - Maio 1987 - p. 24-27.
- 23 - VIGNEAU, J.; BORDEL, P. LEONARD, A. "Influence of the micro estrutura of the composite ceramic tools on their Performance. When Machining Nickel Alloys". Annals of the CIRP, Vol 36/1/1987 p. 13-16.
- 24 - VIGNEAU, J. & BOULANGER, J. "Behaviour of Ceramic Cutting Tools During The Machining of Nickel Base Alloys". Annals of the CIRP, Vol. 31/1/1982 - p. 39.
- 25 - SPK - Feldment Tools. "Catálogo de Ferramenta Cerâmica".
- 26 - SHAW, M. C.; SANTHANAM, S.; RAMARAJ. T.C. " Tool Fracture at the End of a Cut - Pat. 1:- Foot Formation". Transaction of the ASME, Journal of Engineering for Industry - Vol. 110/1988 - p. 333-338.
- 27 - STEMER, G.E. " Ferramentas de Corte" - Ed. da UFSC - Florianópolis - 1987.
- 28 - SORREL, C.C. & MECARTNEY, E.R. "Engineering Nitrogen Ceramics:- Silicon Nitride,  $\beta$  Sialon and Cubic Boron Nitride". Material Forum Vol.9, nº3 - 1986.
- 29 - DIFER "Catálogo de Ferramentas - CBN & Diamante" - 1990.

- 30 - VIGNEAU, J. & BORDEL, P. "Reliability of Ceramic Cutting Tools". Annals of the CIRP Vol. 37/1/1988 - p. 101-104.
- 31 - "Surface Texture (surface roughness) Waviness and Lay", ANSI - ASME B.46.1 - 1985, American Society of Mechanical Engineers. 1985.
- 32 - "Surface Texture Symbols", ANSI Y14. 36-1978. American Society of Mechanical Engineers. 1978.
- 33 - "Surface Integrity", ANSI B. 211.1 - 1986. Society of Manufacturing Engineers. 1986.
- 34 - BELLOWS, G. and TISHILER, DN. "Introductions to surface Integrity", Technical Report - TM 70-974, General Electric Company 1970. p.3.
- 35 - M. FIELD and J. F. KAHLES, "Review of surface Integrity of Machined Components, Annals of the CIRP, Vol.20 (nº2). 1971.
- 36 - PETERS, J. VANHERCK, and SASTRODINOTO, M. "Assesment of surface Typology Analysis Techniques, Annals of the CIRP, Vol. 28 (nº2). 1979.
- 37 - MACHINING DATA HANDBOOK, Vol 2, 3 rd ed, Research Associates. 1980 p. 18-15 to 18-37.
- 38 - Society of Automotive Engineers. "Residual stress measurement by X-ray diffraction. Warrendale PA., 1980.
- 39 - MAEDER. G.; LEBRUM, J.L.; SPRAVEL, J.M. "Present possibilities for the X-ray diffraction - method of stress measurement. NDT Int., 14(5): 235-247. 1981.
- 40 - PARTHIRAJ, B. & VASUDEVAM, R. "Residual stress in materials and their measurement by X-ray". TISCO - Tech J.; 24 (3) 109-120 p., 1977.
- 41 - GREENOUGH, G.B. Residual stress associated With lattice strain in osgoot, W.R."Residual Stresses in Metal Construction" - N.W. Reinhold Publishing Co., 1954.
- 42 - NELSON, D.V.; RICKEFS, R.E.; EVANS, W.P. - Residual stresses in quenched and temperd plain carbon steels - SAE Tech Paper Séries. (710283): 1-9 1971.
- 43 - ALMEN, J.O. & BLACK, P.H. - Basic theories relating to fatigue in metals - Metals Eng. Cluart., 6 (1) - p. 9-15 - 1966.
- 44 - RUUD, C.O. "A review of selected non-destructive methods fos residual stress measurement". NDT Int - 15 (1):15-23 p., 1982.
- 45 - RUUD, C.O. "A review of non-destructive methods for residual stress measurement. J.Met. 33 (7): 35-39 p., 1981.

- 46 - JAMES, M.R. & CHEN, J. B. "Study of the precision of X-ray stress analysis. Adv. X-ray. Anal. 20:291 - 307 p. 1977.
- 47 - ZANTAPULOUS, H. & LACTZATE, L. F. "Systematic errors in X-ray measurement due to specimen geometry and beam divergence. Adv. X-ray. Anal. 14:360-375 p. 1971.
- 48 - LANDAN, L. et. LIFCHITZ, E. "Théorie de L'Elasticité". 2ed., Éditions Mir, Moscou, 1967 (7<sup>e</sup> tome du Cours de Physique Théorique).
- 49 - MIDDLETON, J. C. Residual Stress and X-rays. NDT International, 20, 1987, 291-294
- 50 - DEVARAJAN, N. An X-ray Counter Diffractometer Device for stress measurement in Austenitic steels. NDT International, 17, 1984, 67-72 p.
- 51 - MUNHOZ, Jr., DORIVAL - "Determinação de tensões residuais e austenita retida em aços cementados usando difração de raio-x." Tese de Mestrado 1983, São Carlos, UFSCAR, p.42-55.
- 52 - GUIAMARÃES, R. LUCIANA. "Estudo de parâmetros experimentais envolvidos na determinação de macrotensões residuais em tubos de aço inoxidável, pelo método da difração de raios-X. Tese de Mestrado 1990, São paulo, USP, p.31-42
- 53 - WOFSTIEG, Arch, Eisenhüttenwes, 30(1949) S. 447
- 54 - SACHS, G., Weerts, J., Z. Phys., 64, 481 (1930): ibid 64, 344 (1930)
- 55 - OGISO, K., & others, Materials, Contributed for Dec issue, (1972).
- 56 - Instruction Manual for Strainflex MFS-2M e Strainflex PSF-2M, Rigaku Manual nº PSF-2M-1992.
- 57 - SPK Feldmühle Catálogos sobre Insertos Cerâmicos o Aplicações - Divulgado por Gremafer Ltda.
- 58 - Machining Data Hand book. Vol.2 - rd ed. Metcut Research Associates, 1980 p.18-87.
- 59 - Machining Data Hand book. Vol. - rd ed Metcut Research Associates, 1989 p. 19-36.
- 60 - COSTA, D. D. - "Análise dos Parâmetros de torneamento de aços endurecidos" - Tese de Mestrado 1993, Campinas, UNICAMP - p. 6-15-16

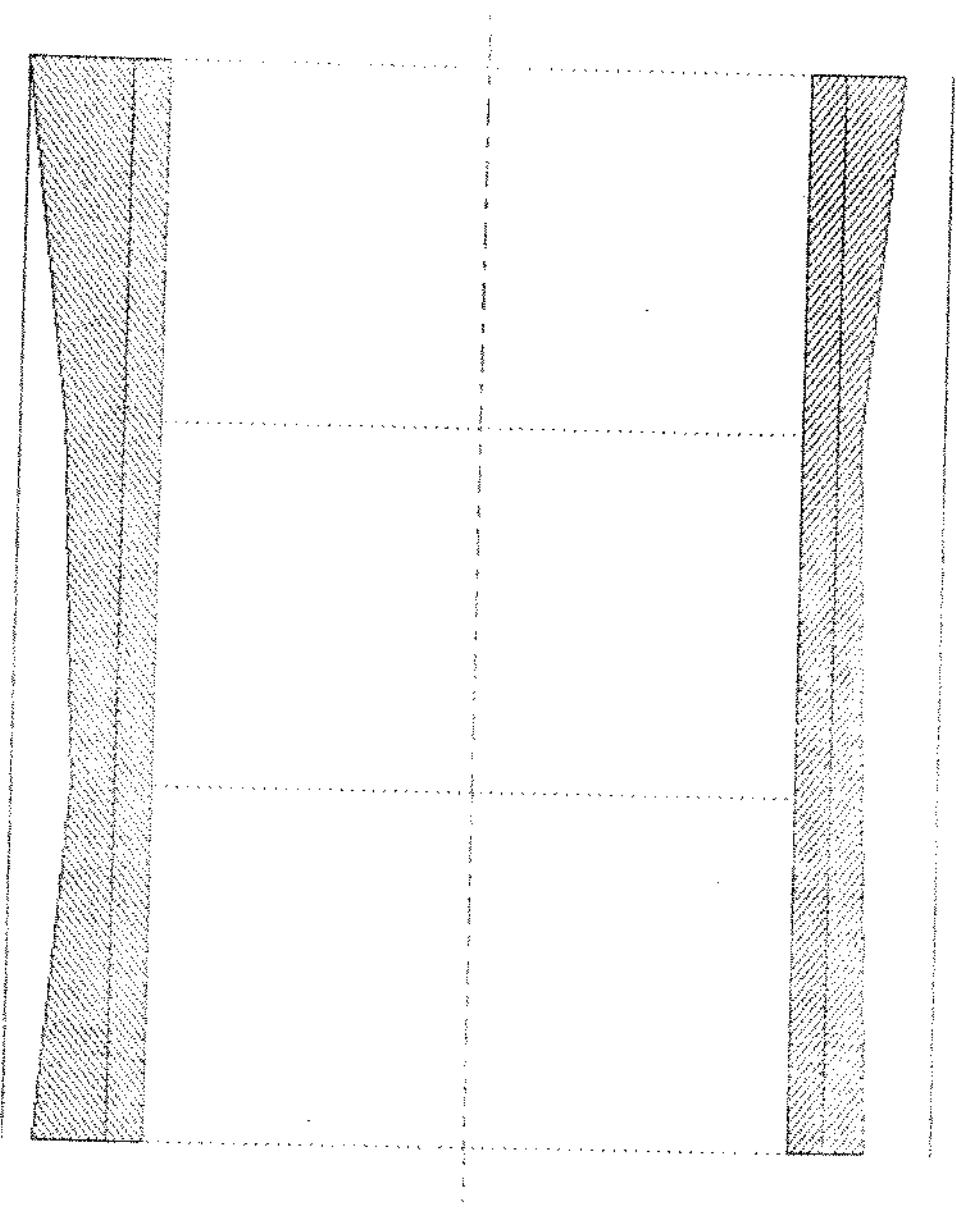
## **ANEXO A**

### **MEDIDAS DE CILINDRICIDADE E CIRCULARIDADE**

25.0 mm →

5 um

1.0 mm →

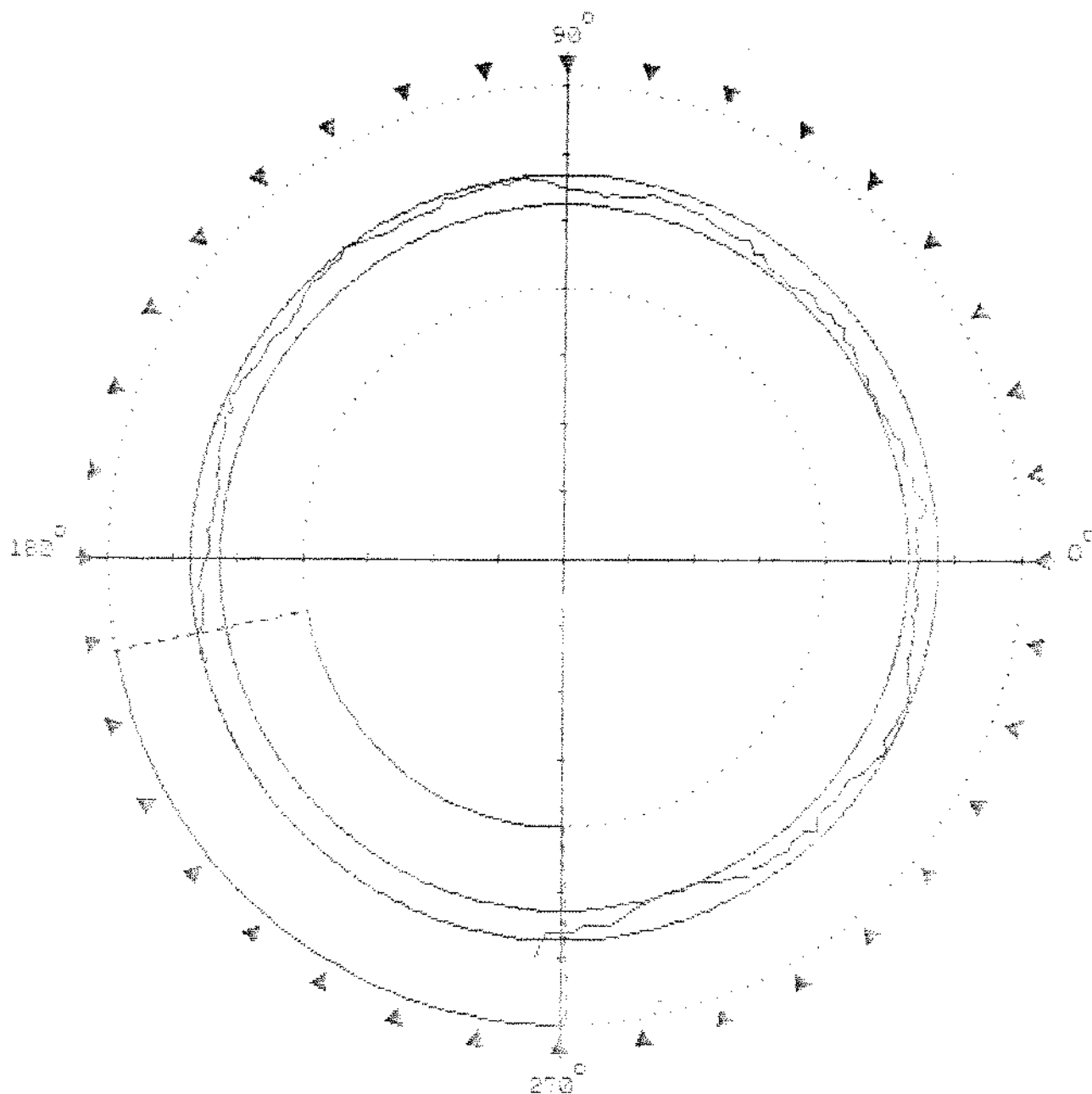


MZ CYLINDER RESULTS

Peak to valley	6.40 um	Measurement mode	External
Max. parallelism	-13.80 um @ 50.4 deg	Number of planes	4
Current parallelism	2.75 um @ 87.8 deg	Filter	50 um
$\Delta^*$	8.10 um	Profile	50.2 %
① DMR	4.75 um		

Datum : SPINDLE

RTH TR3

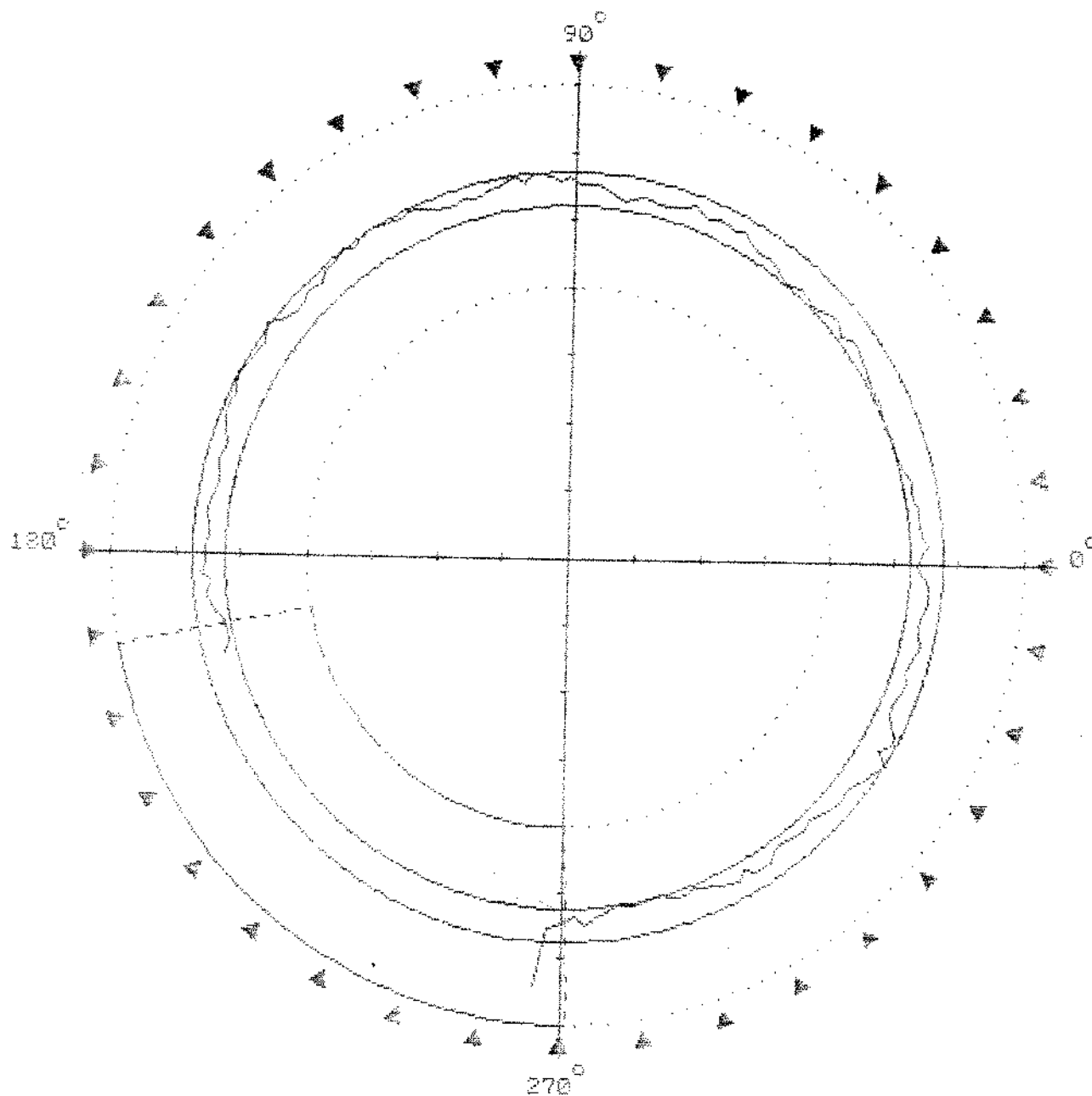


MZ ROUNDNESS RESULTS

75.004 mm	Meas. mode	External
2.25 um	Z Height	25.0 mm
1.48 um	Filter	50 um 20R
272.4 deg	Profile	78.4 %
3.90 um	Points deleted	3
Datum : SPINDLE		

RTH TR3



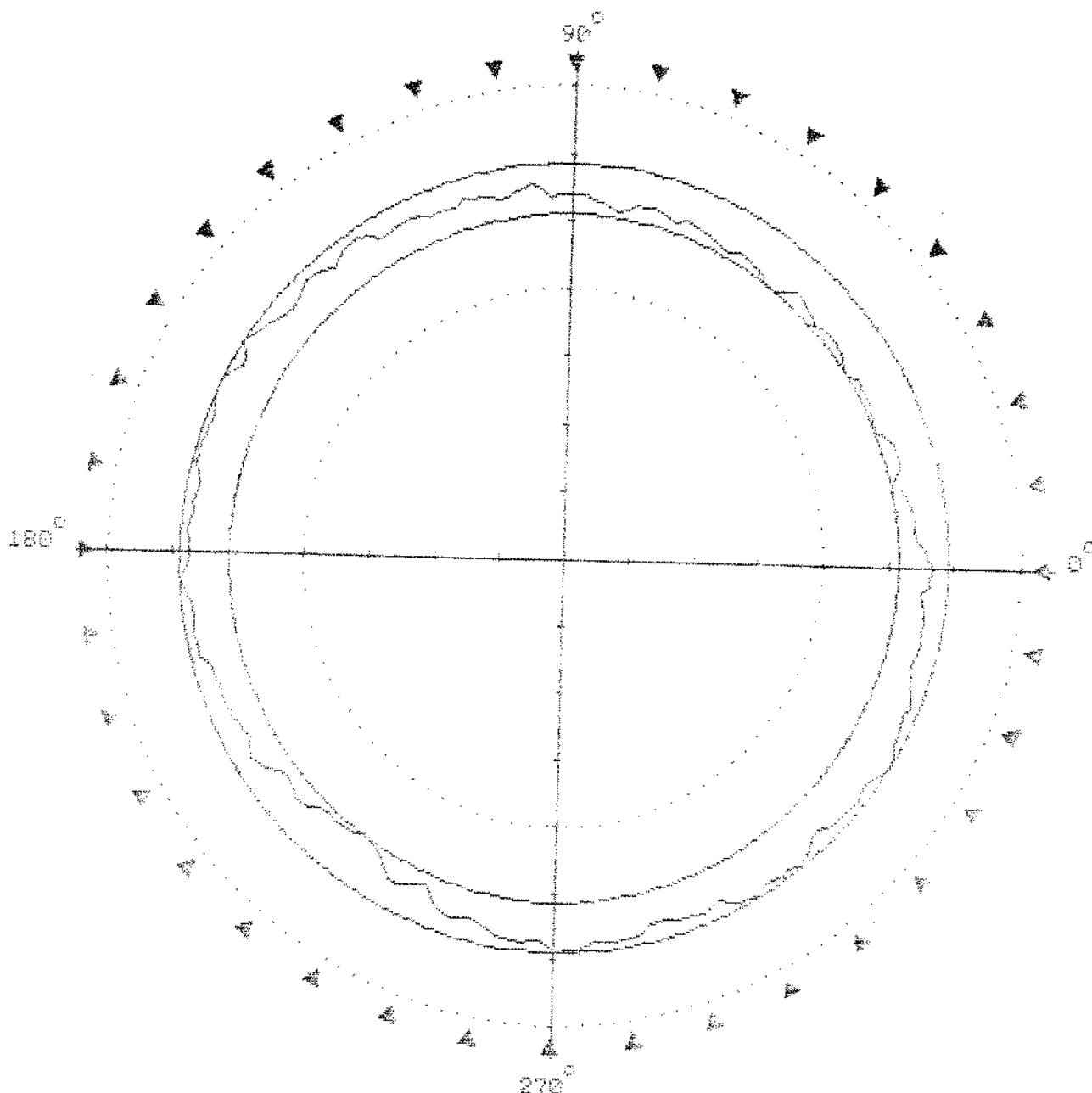


R  
 O  
 U  
 N  
 D  
 E  
 S  
 S  
 ↗

MZ ROUNDNESS RESULTS

75.001 mm	Meas. mode	External
2.65 um	Z Height	17.0 mm
1.70 um	Filter	50 upr 2CR
276.8 deg	Profile	78.4 %
4.80 um	Points deleted	3
Datum : SPINDLE		

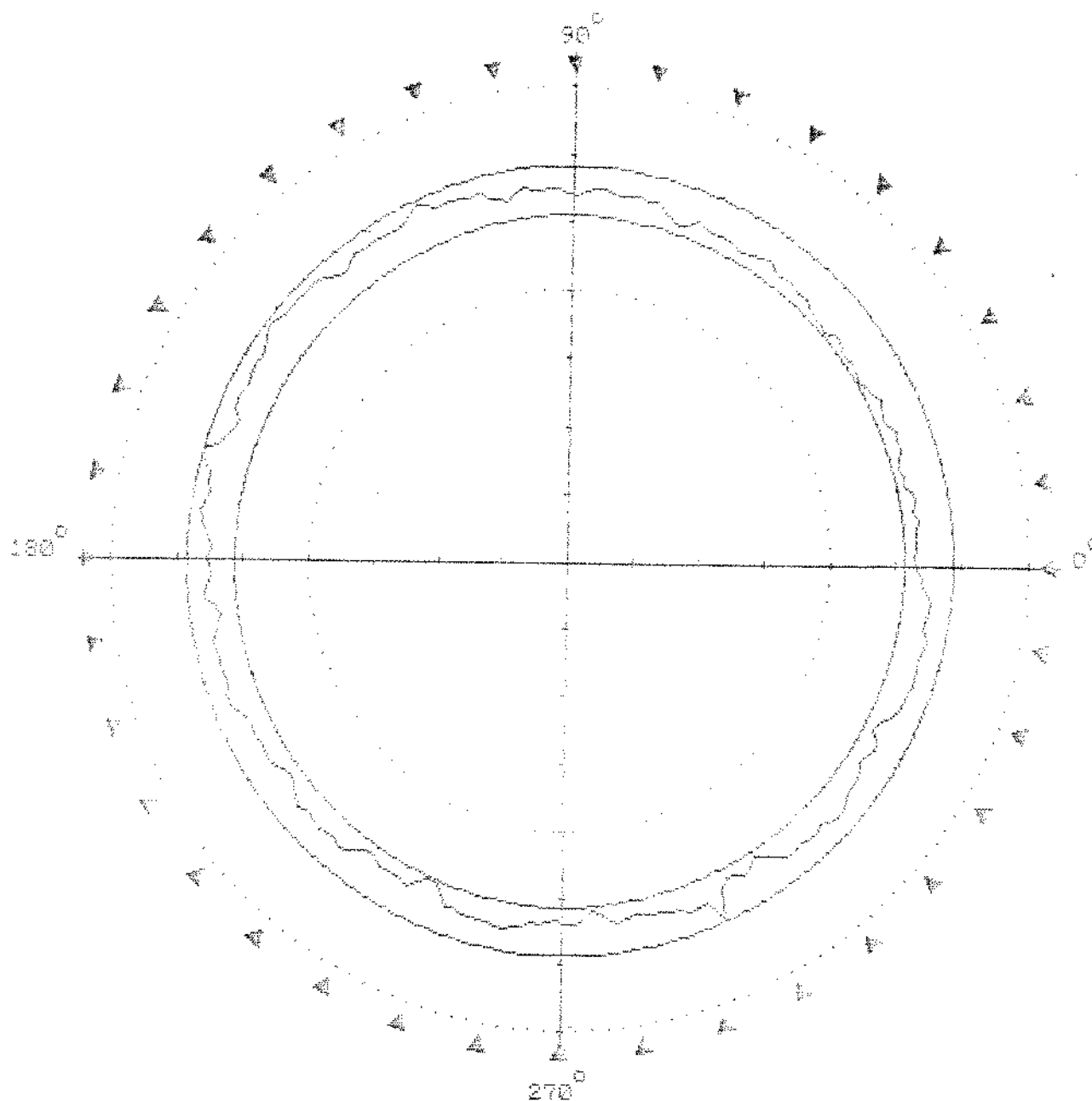
RTH TR3



# MZ ROUNDNESS RESULTS

75.001 mm	Meas. mode	External
3.85 um	Z Height	9.0 mm
0.75 um	Filter	50 upr 3CR
309.1 deg	Profile	100.0 %
4.75 um		
Datum : SPINDLE		

RTH TR3



# MZ ROUNDNESS RESULTS

75.000 mm	Meas. mode	External
3.60 um	Z Height	1.0 mm
2.45 um	Filter	50 um 2CR
270.3 deg	Profile	100.0 %
7.60 um		
Datum : SPINDLE		

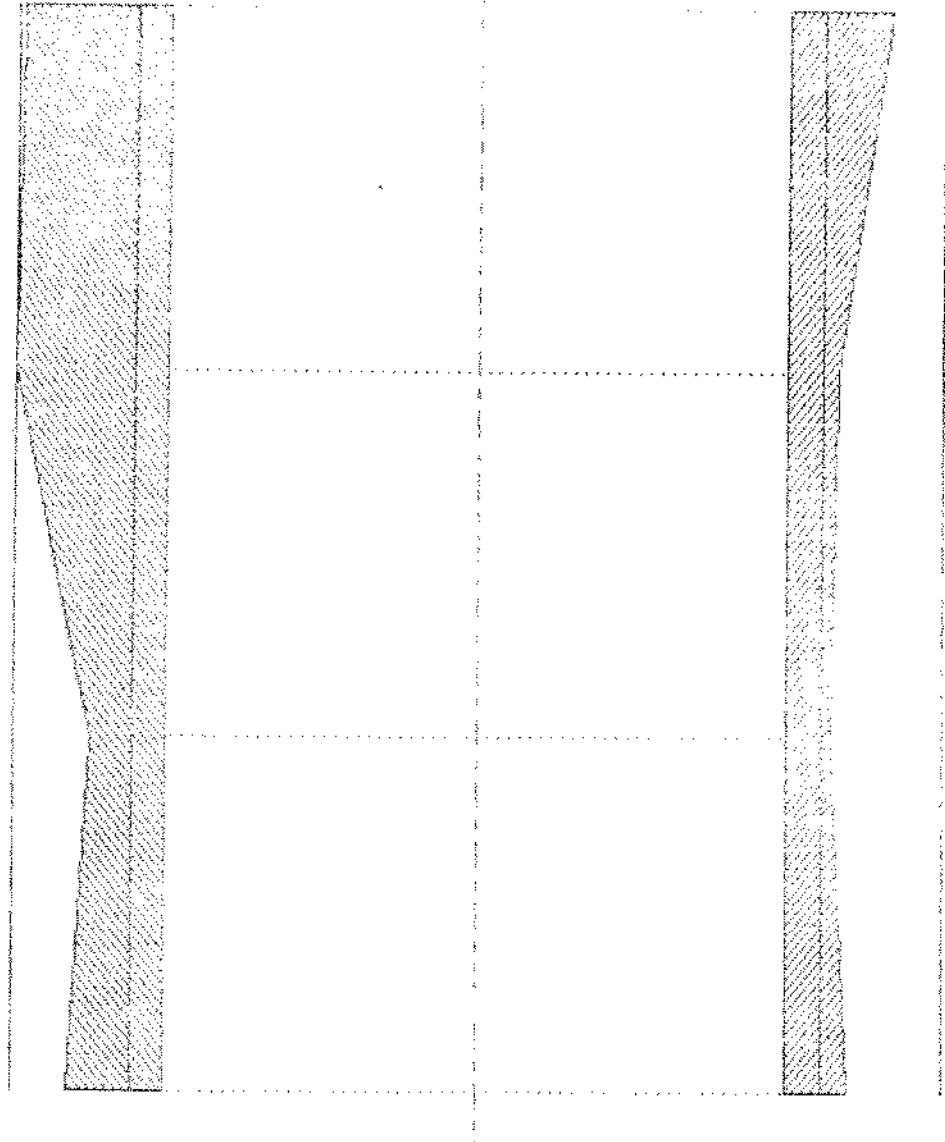
POE  
Z  
A

RTH TR3

19.0 um

2 um

0.0 mm

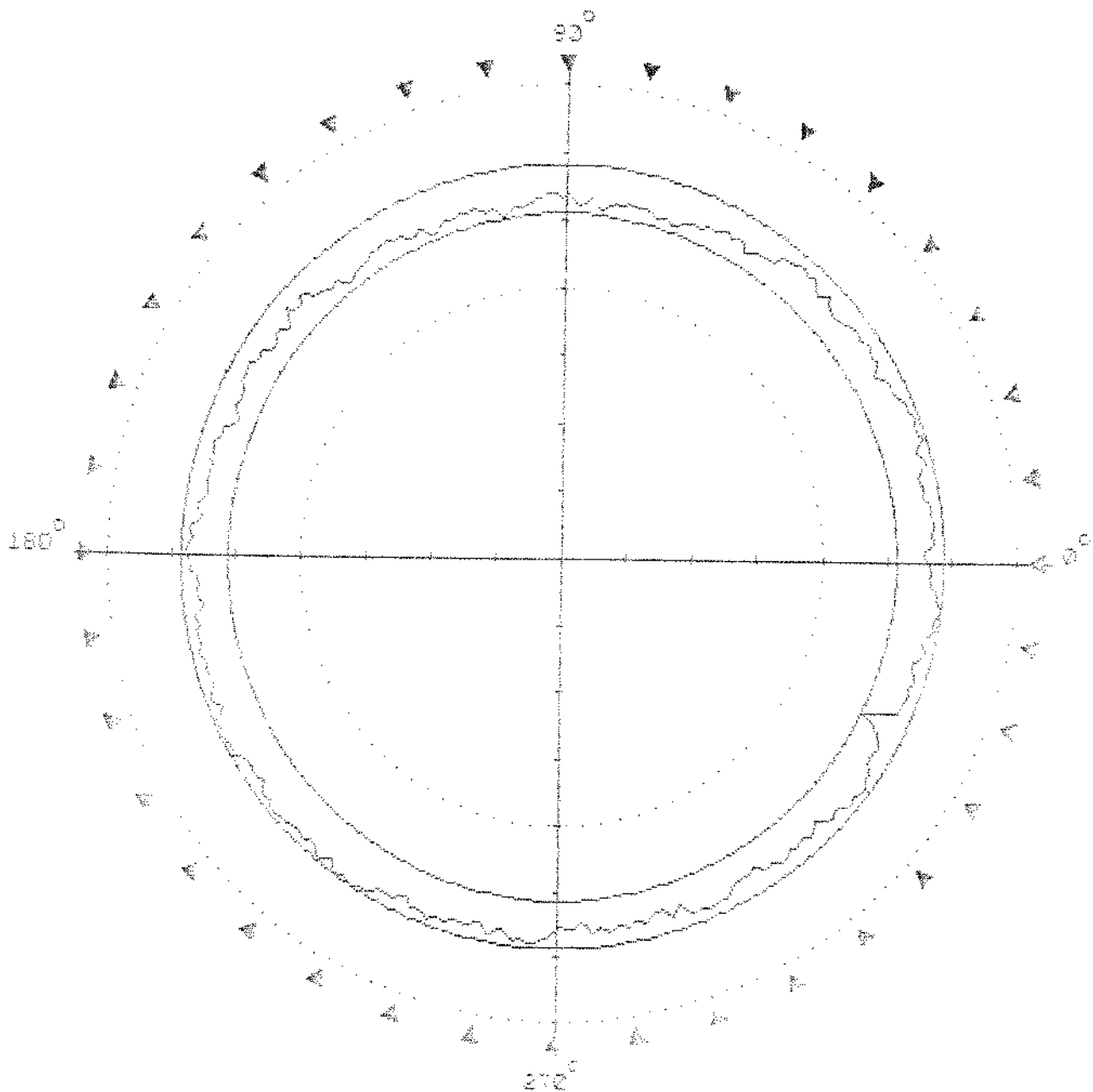


12 CYLINDER RESULTS

Peak to valley	2.35 um	Measurement mode	External
Peak parallelism	-5.50 um @ 55.5 deg	Number of planes	4
Current parallelism	2.65 um @ 93.0 deg	Filter	50 um
7.70 um		Profile	90.0 %
6.40 um			

Datum : SPINDLE

RTH TR3

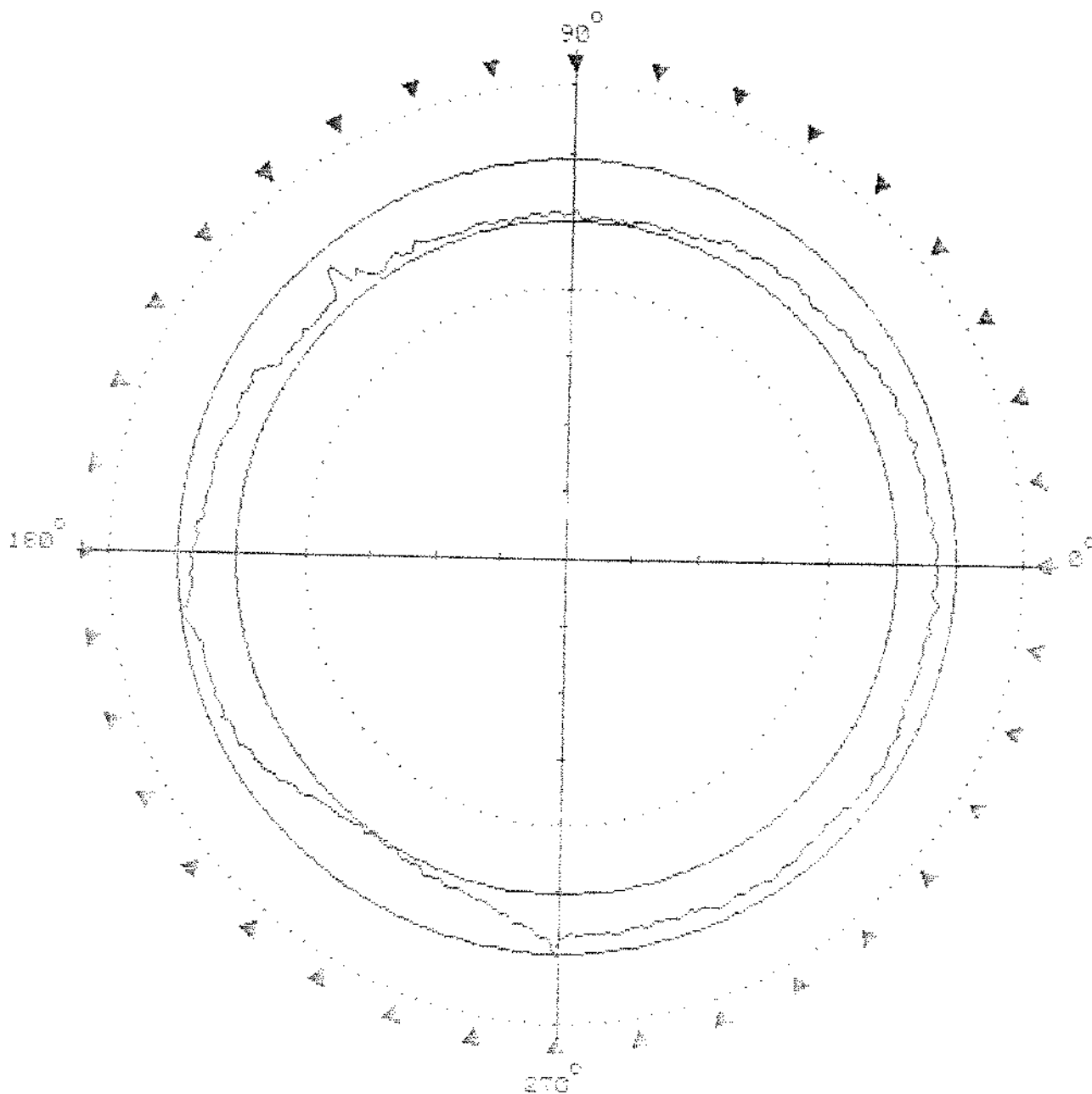


WZ ROUNDNESS RESULTS

74.993 mm	Meas. Mode	External
1.45 um	Z Height	0.2 mm
0.55 um	Filter	50 um 2CR
123.0 deg	Profile	100.0 %
Datum : SPINDLE		

1.11000

RTH TR3

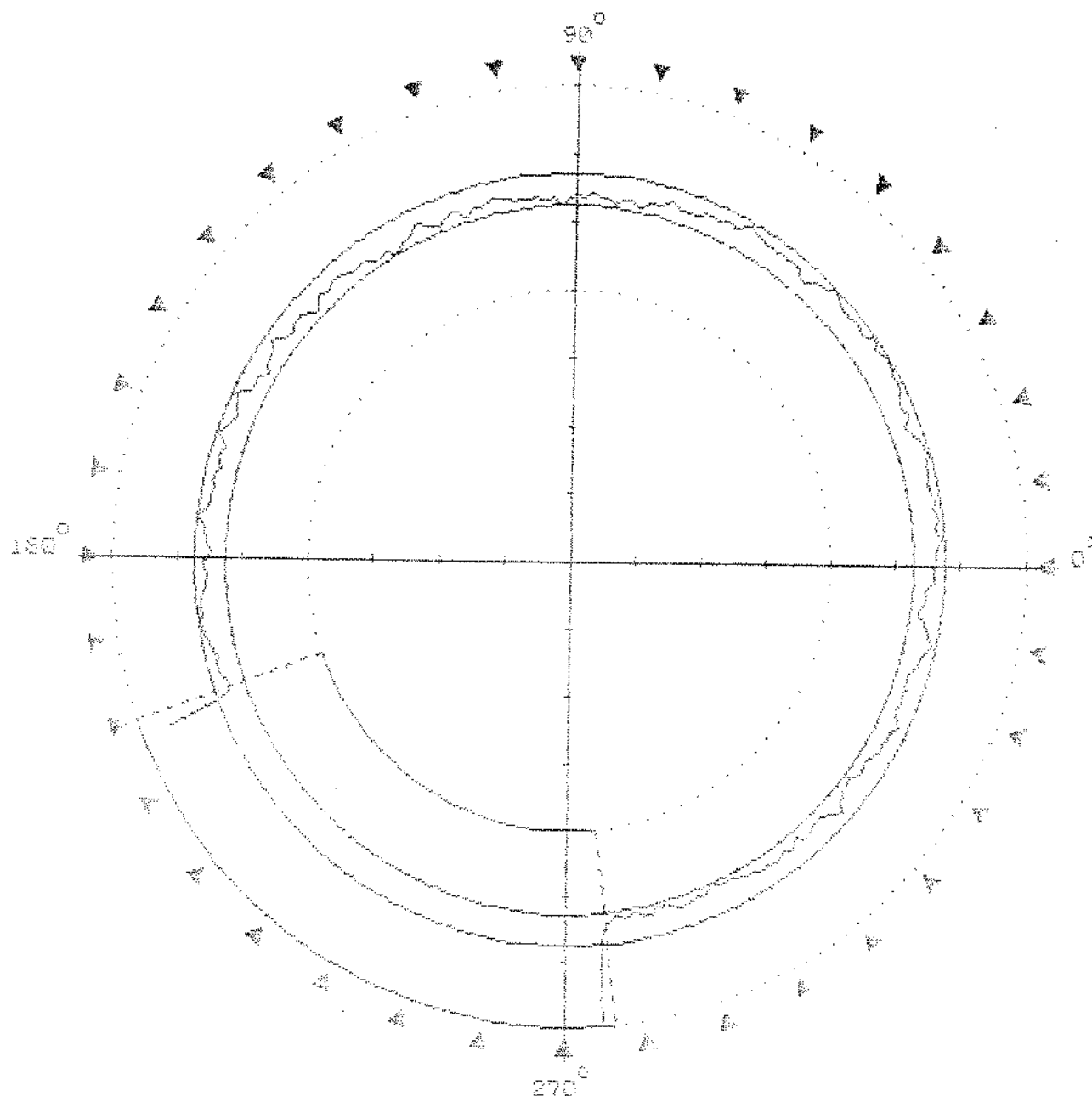


# MZ ROUNDNESS RESULTS

74.932 mm	Meas. Mode	External
1.80 um	Z Height	8.0 mm
0.95 um	Filter	50 um 20R
206.6 deg	Profile	100.0 %
3.50 um		
Datum : SPINDLE		

FOE  
/

RTH TR3



ME ROUNDNESS RESULTS

74.982 mm	Meas. mode	External
0.95 um	Z Height	16.0 mm
2.35 um	Filter	50 um 20R
239.5 deg	Profile	79.0 %
4.60 um	Points deleted	3

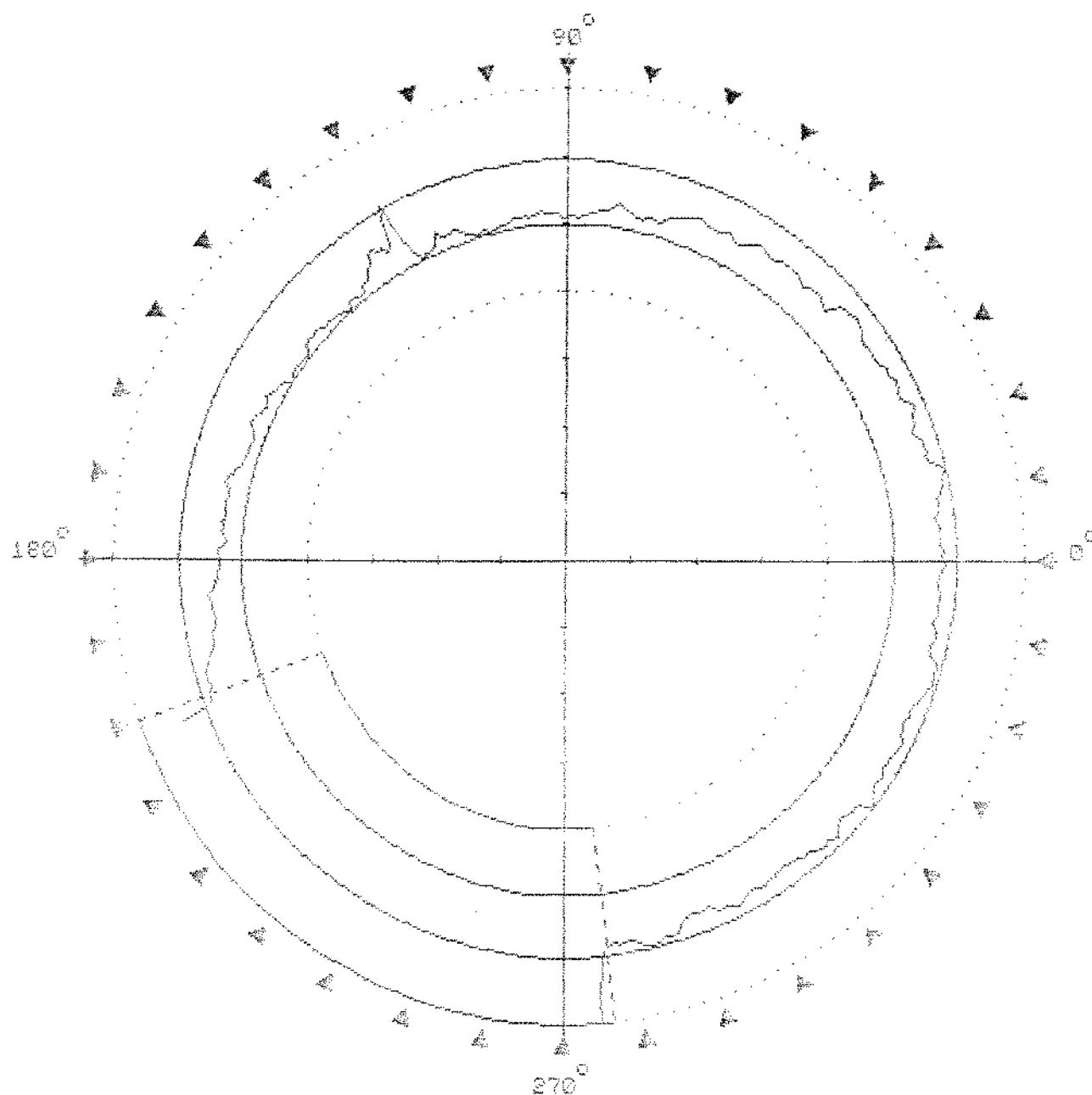
Datum : SPINDLE

Note: max. display width exceeded

R  
O  
U  
N  
D  
N  
E  
S  
S

RTH

TR3



1/2 ROUNDNESS RESULTS

74.983 mm	Meas. mode	External
1.95 um	Z Height	24.0 mm
2.95 um	Filter	50 upr 2CR
229.9 deg	Profile	79.0 %
6.50 um	Points deleted	3

Datum : SPINDLE

Note: max. display width exceeded

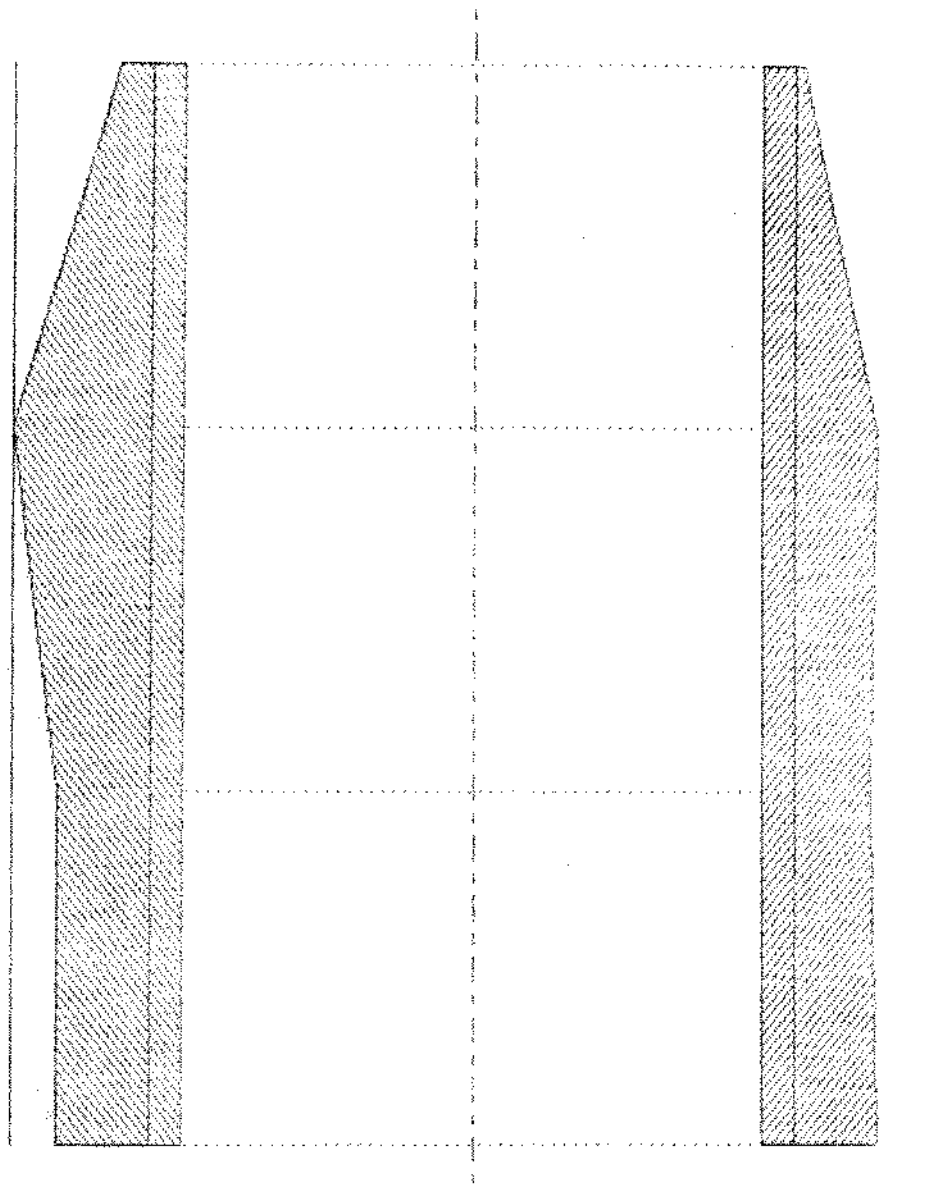
RTH TR3



24.0 mm →

2 um

0.0 mm →

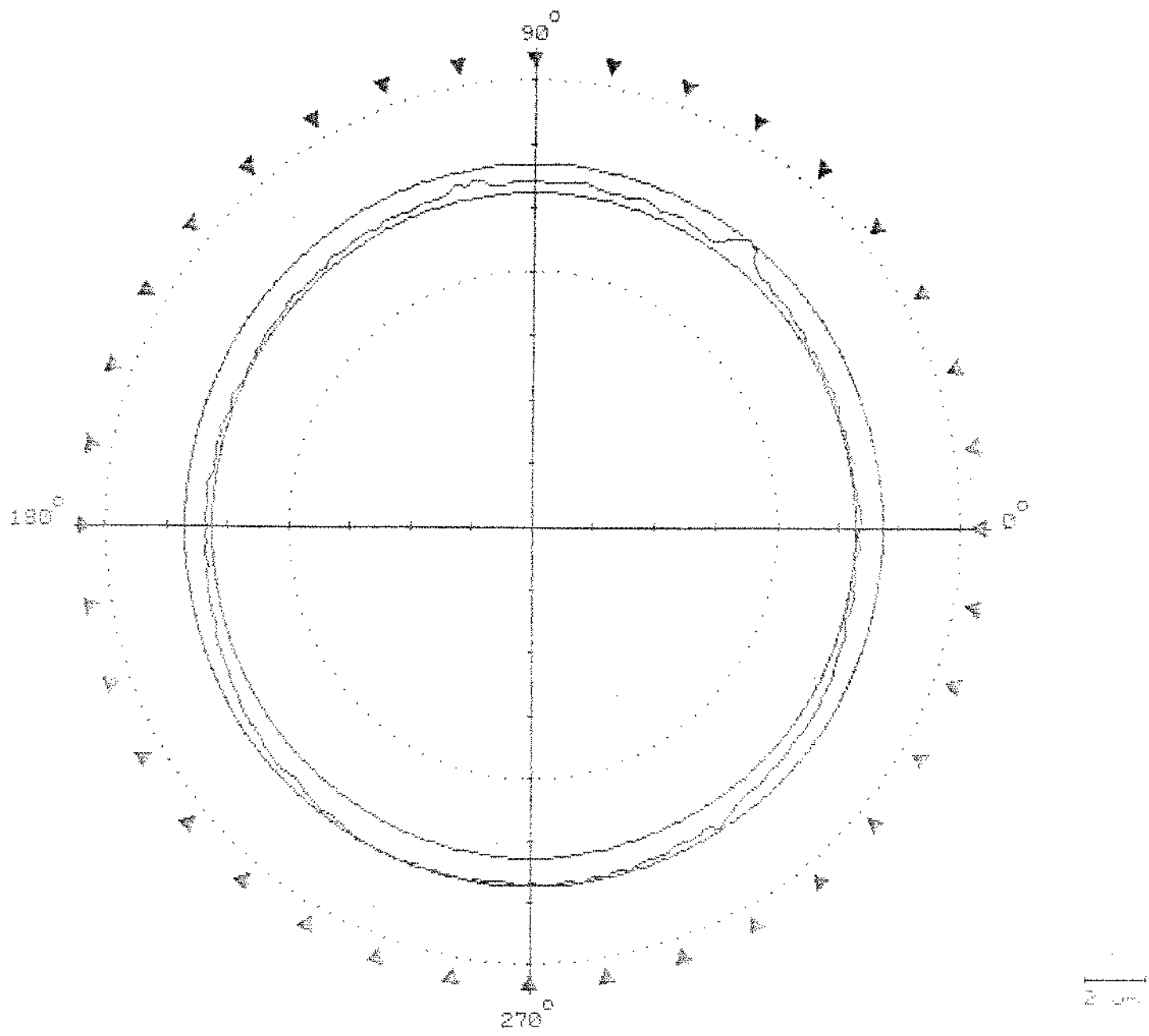


# NZ CYLINDER RESULTS

Peak to valley	3.55 um	Measurement mode	External
Max. parallelism	-6.40 um @ 38.2 deg	Number of planes	4
Current parallelism	-2.75 um @ 5.8 deg	Filter	50 um
$\Delta$	5.35 um	Profile	25.3 %
① INN	3.30 um		

Datum : SPINDLE

RTH TR3

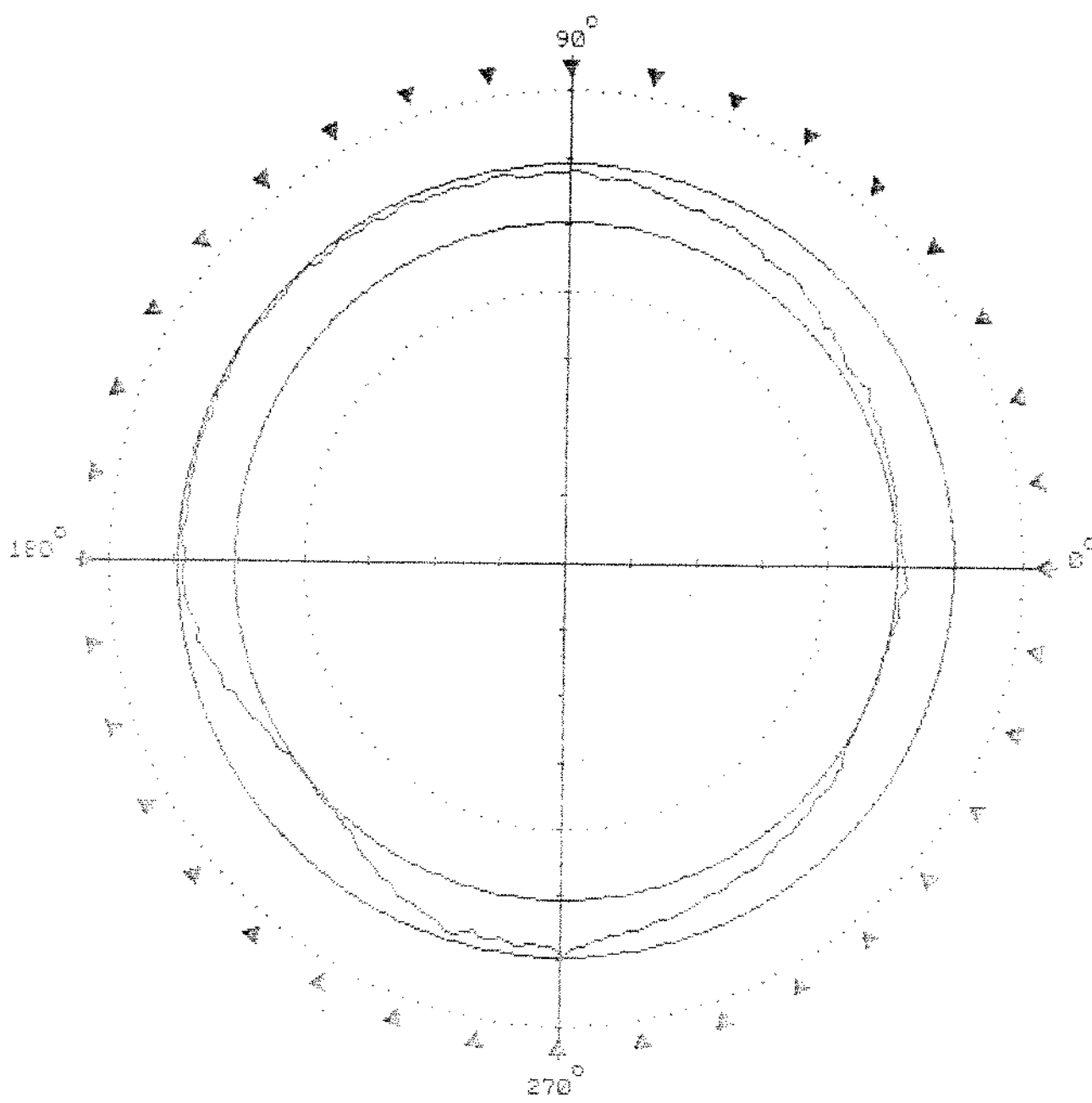


MZ ROUNDNESS RESULTS

74.995 mm	Meas. mode	External
0.95 um	Z Height	0.2 mm
0.65 um	Filter	50 um 2CR
199.4 deg	Profile	100.0 %
1.95 um		
Datum : SPINDLE		

PROFILE

RTH TR3

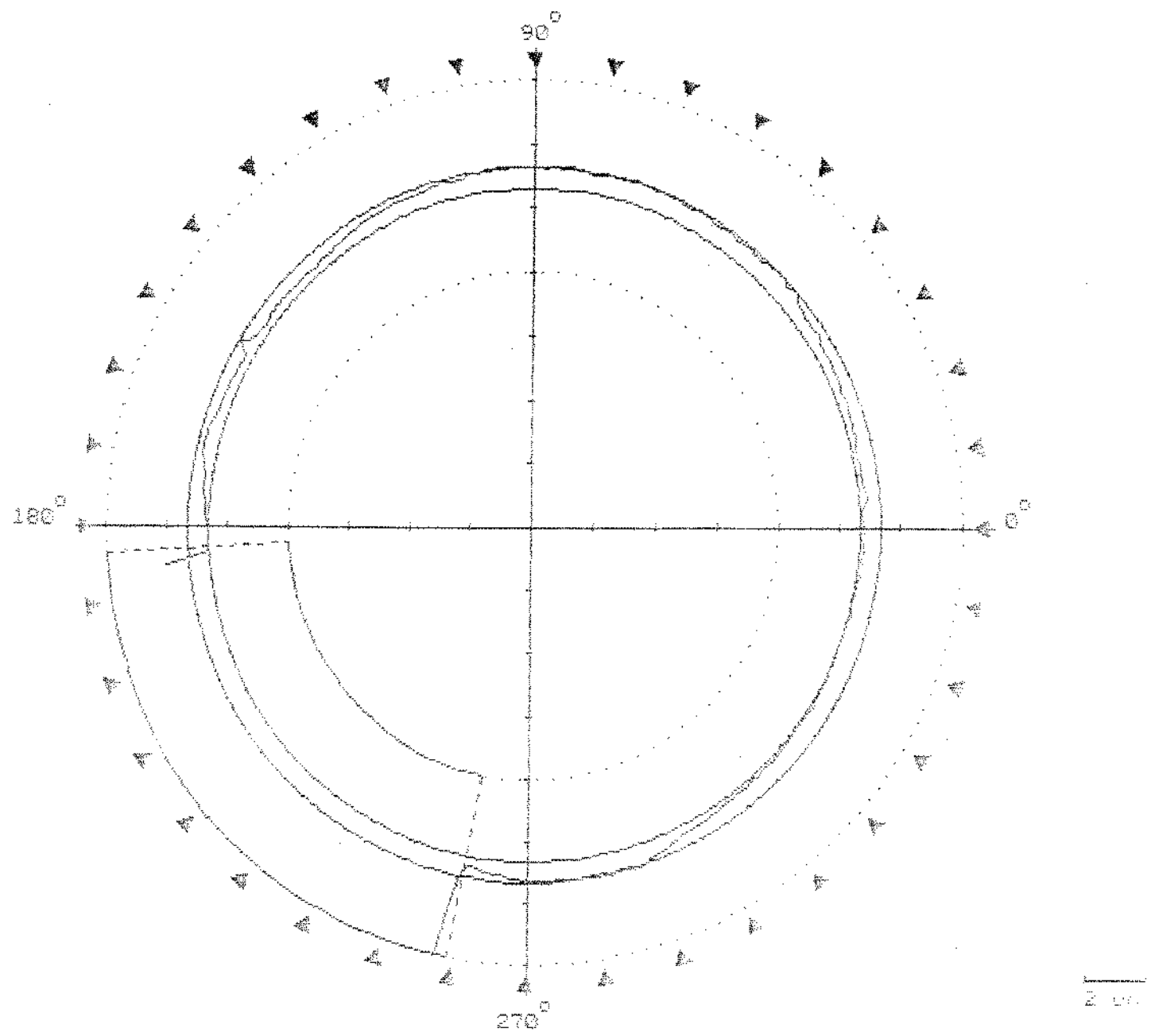


MZ ROUNDNESS RESULTS

74.994 mm	Meas. mode	External
1.75 um	Z Height	8.0 mm
0.20 um	Filter	50 upr 20R
219.6 deg	Profile	100.0 %
1.95 um		
Datum : SPINDLE		

RTH

RTH TR3



MZ ROUNDNESS RESULTS

74.995 mm	Meas. mode	External
0.70 um	Z Height	16.0 mm
1.10 um	Filter	50 upr 2CR
146.4 deg	Profile	79.2 %
2.75 um	Points deleted	3

Datum : SPINDLE

Note: max. display width exceeded

FROM  
↙

RTH TR3



## ROE L

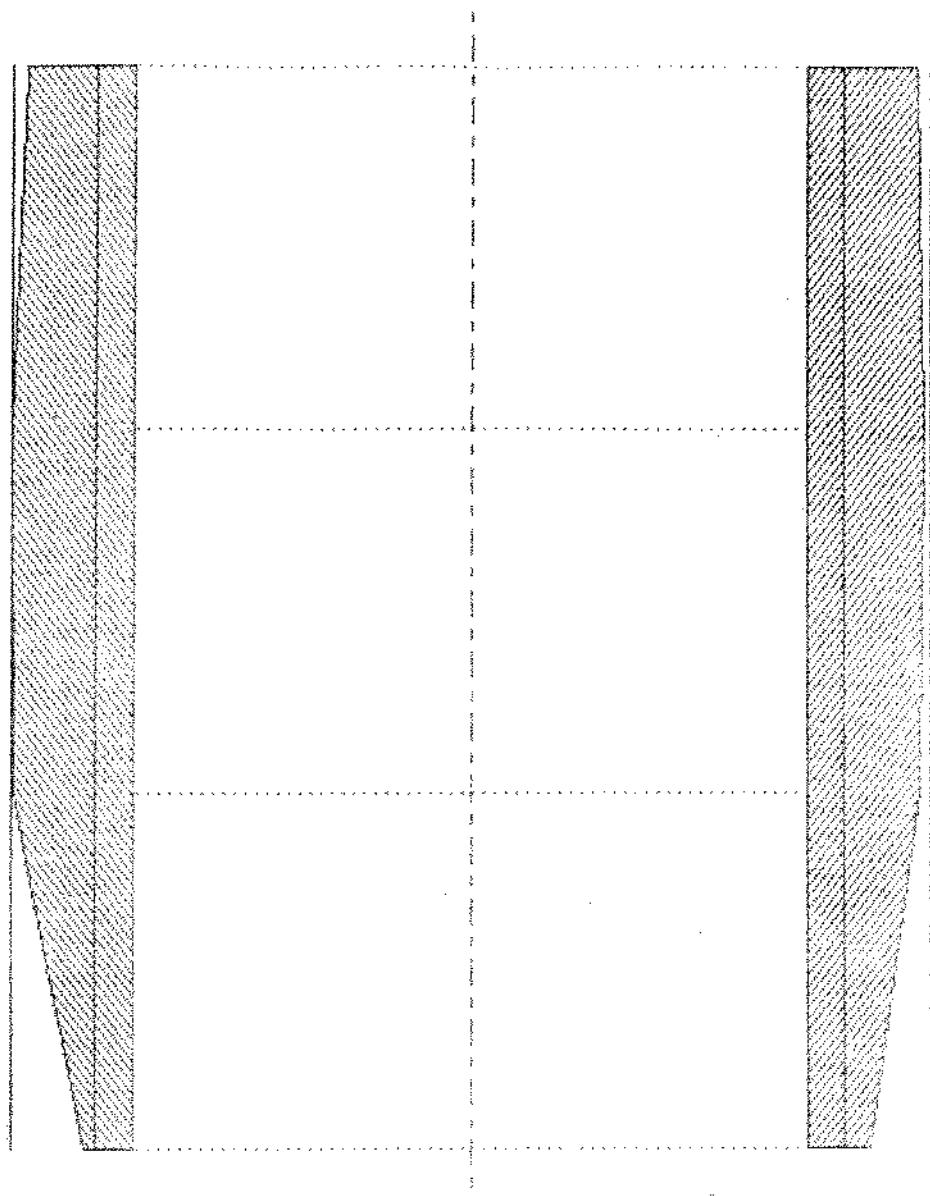
## THEORY

RTH TRS

15.0 mm →

5 um

0.0 mm →

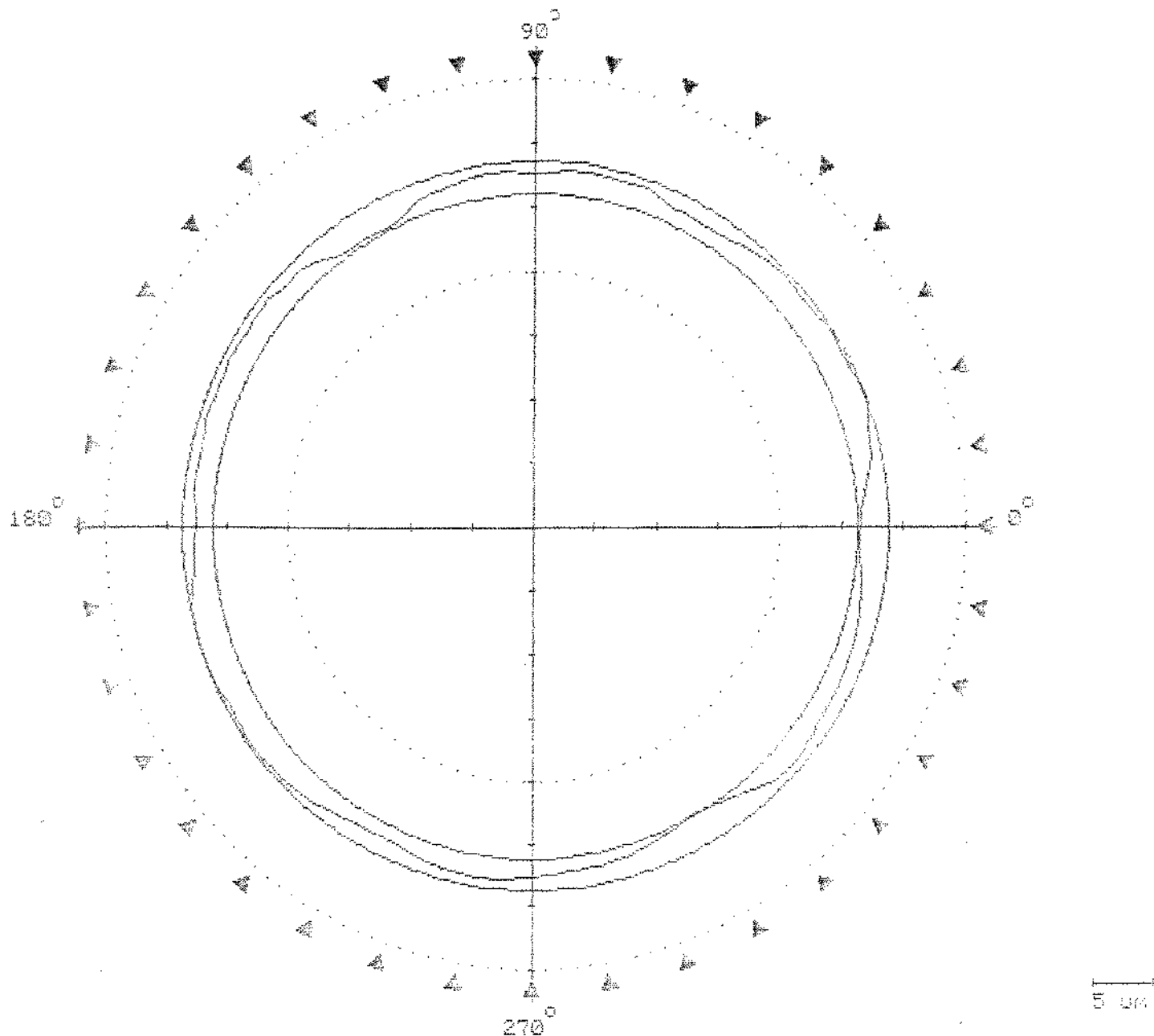


MZ CYLINDER RESULTS

Peak to valley	5.10 um	Measurement mode	External
Max. parallelism	5.90 um @ 60.4 deg	Number of planes	4
Current parallelism	5.96 um @ 60.4 deg	Filter	50 upr
$\lambda$	7.10 um	Profile	100.0 %
① DIN	3.55 um		

Datum : SPINDLE

RTH TR3



RO  
E  
Z  
↗

MZ ROUNDNESS RESULTS

75.008 mm	Meas. mode	External
2.60 um	Z Height	0.0 mm
1.60 um	Filter	50 um ZCR
199.0 deg	Profile	100.0 %
5.45 um		
Datum : SPINDLE		

RTH TR3

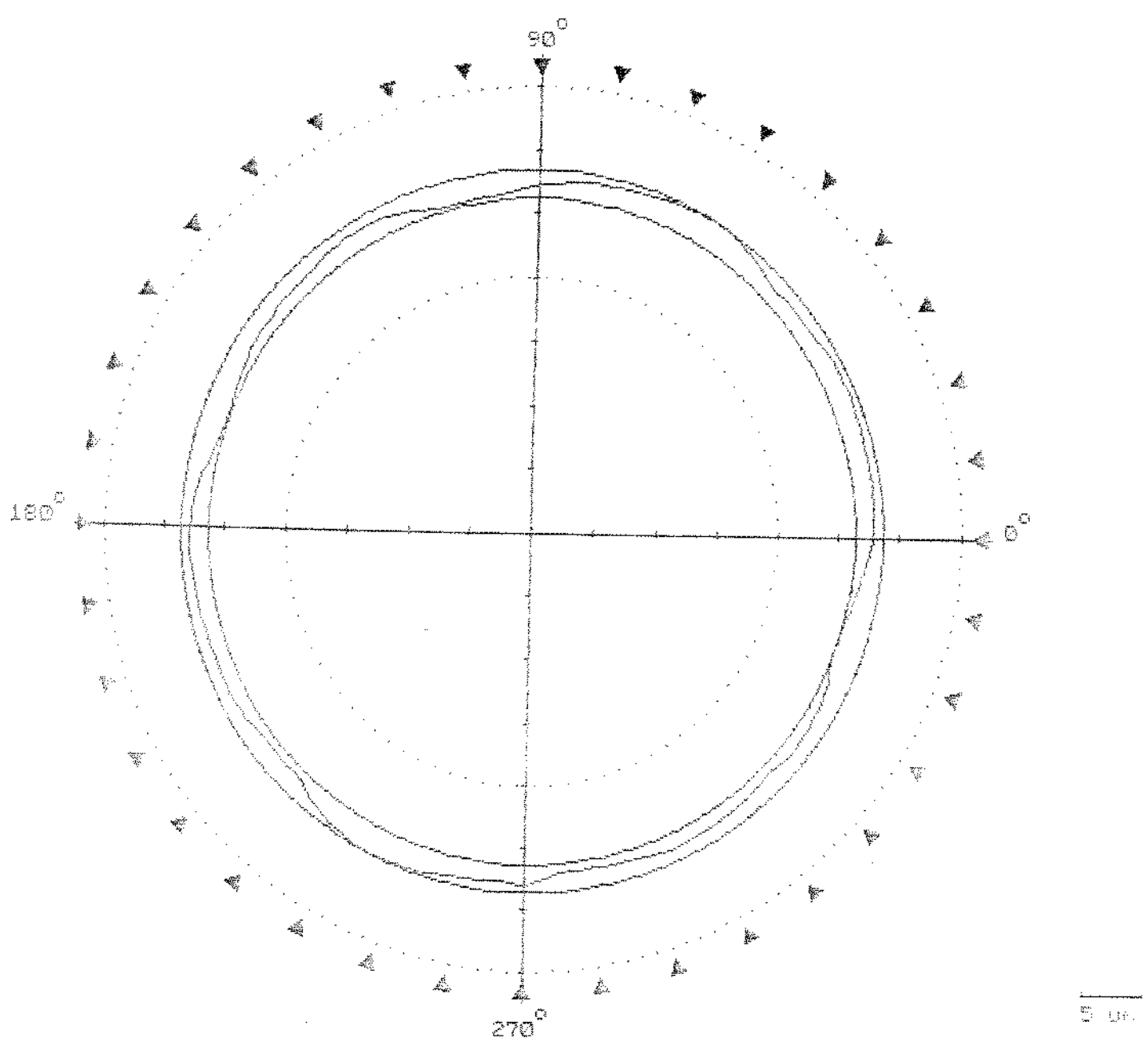
## ME ROUNDNESS RESULTS

75.011 mm	Meas. mode	External
1.95 um	Z Height	5.0 mm
0.85 um	Filter	50 um ZCR
208.2 deg	Profile	100.0 %
3.25 um		
Datum : SPINDLE		

ROE Z

RTH TR3



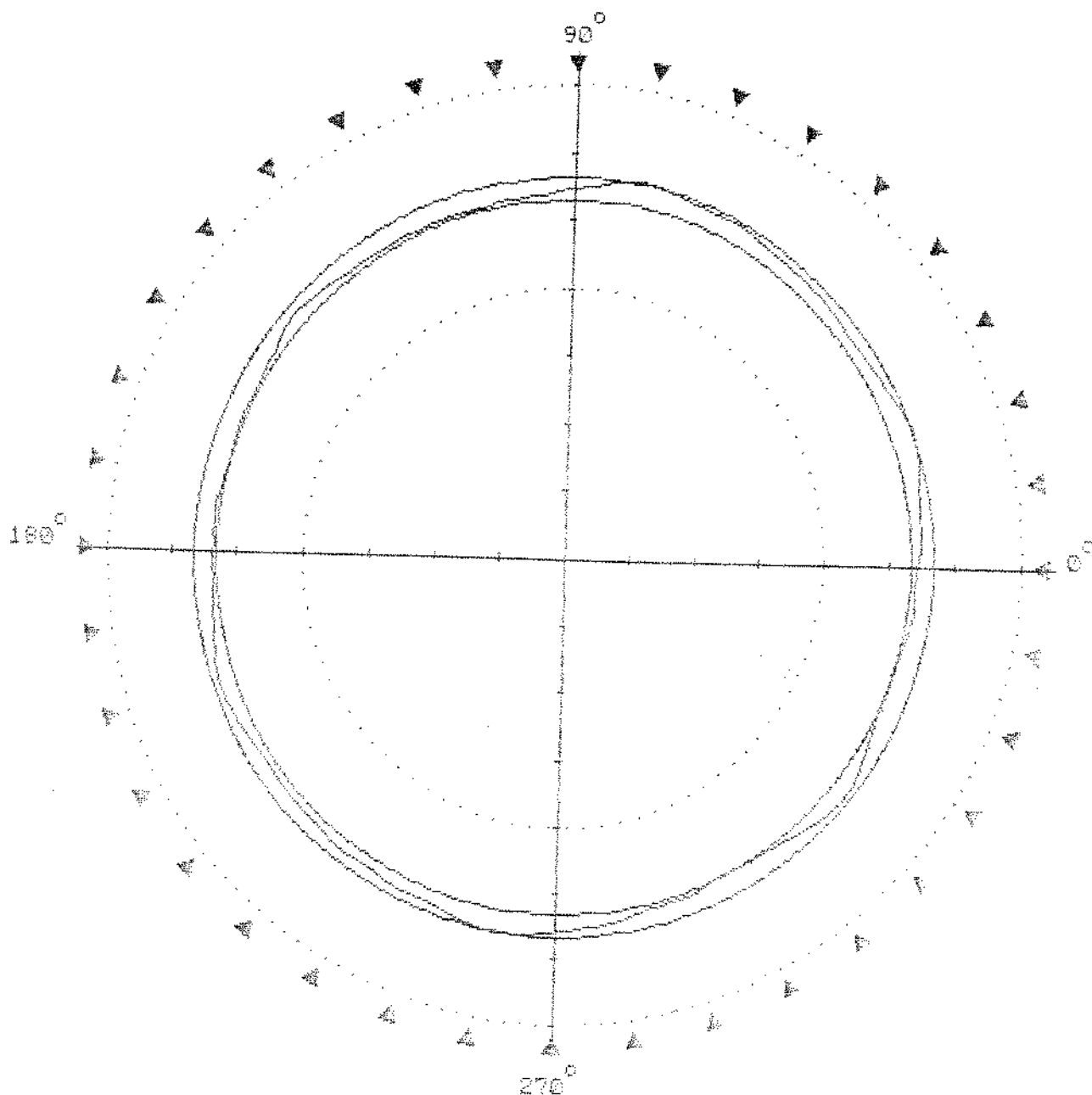


MZ ROUNDNESS RESULTS

75.011 mm	Meas. mode	External
2.25 um	Z Height	10.0 mm
0.95 um	Filter	50 um 2CR
168.0 deg	Profile	100.0 %
3.45 um		
Datum : SPINDLE		

FOR  
E  
Z  
A

RTH TR3



MZ ROUNDNESS RESULTS

75.011 mm	Meas. mode	External
1.80 um	Z Height	15.0 mm
0.90 um	Filter	50 umr 2CR
137.8 deg	Profile	100.0 %
3.05 um		
Datum : SPINDLE		

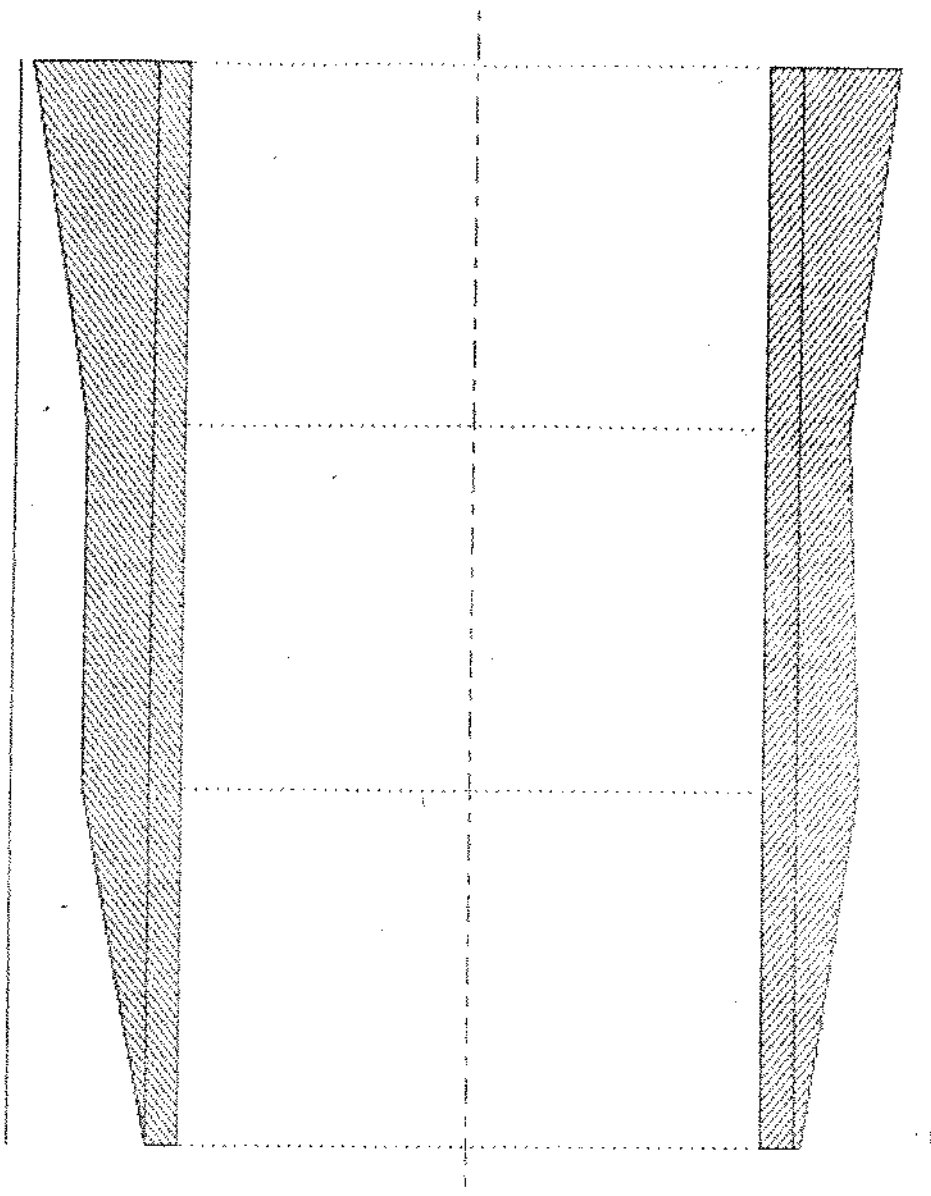
R  
 O  
 U  
 N  
 D  
 N  
 E  
 S  
 S

RTH TR3

15.0 mm →

2 um

0.0 mm →

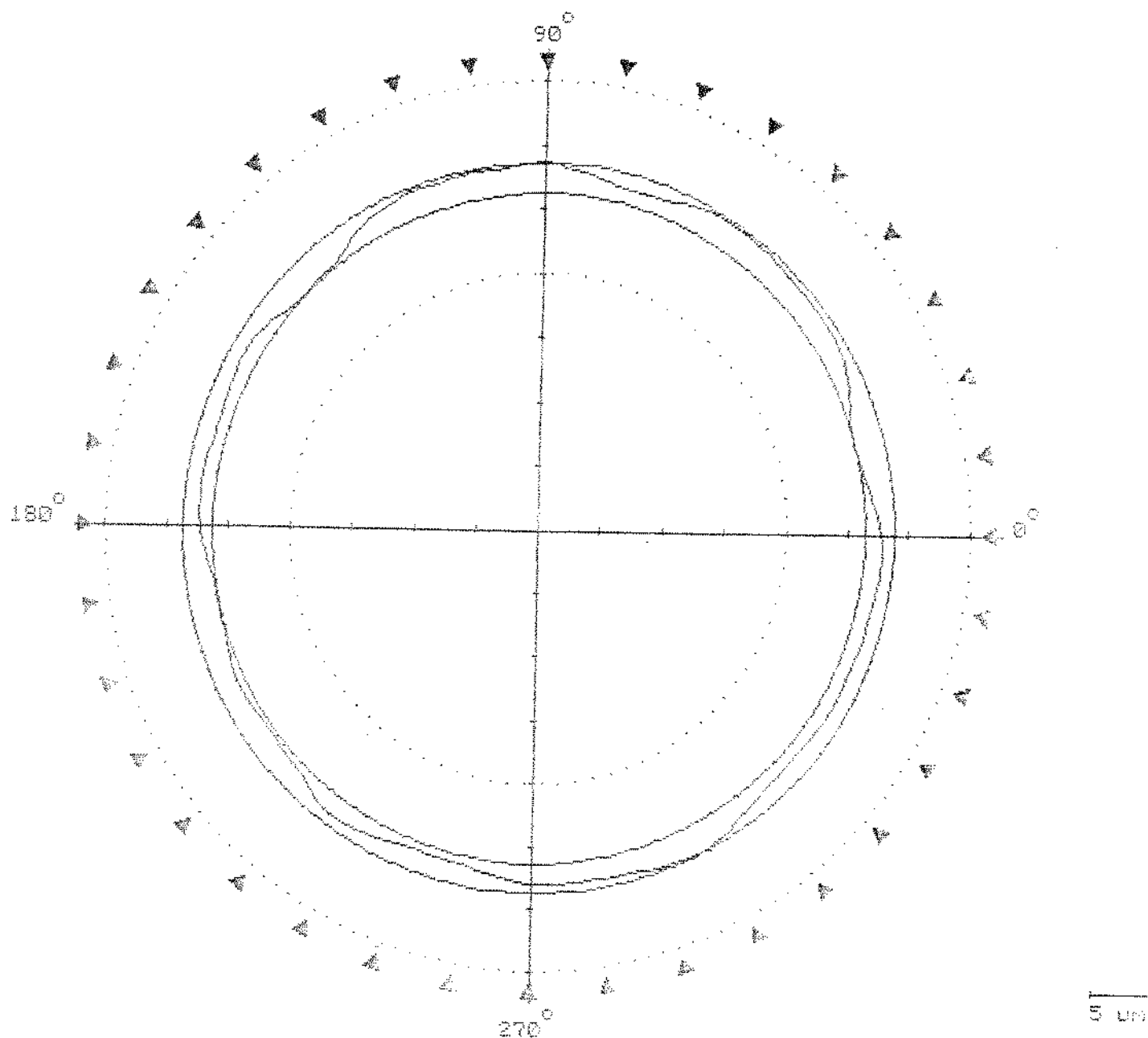


#### MZ CYLINDER RESULTS

Peak to valley	3.55 um	Measurement mode	External
Max. parallelism	4.85 um @ 11.5 deg	Number of planes	4
Current parallelism	4.85 um @ 11.5 deg	Filter	50 um
②	5.25 um	Profile	100.0 %
① DIN	2.45 um		

Datum : SPINDLE

RTH TR3

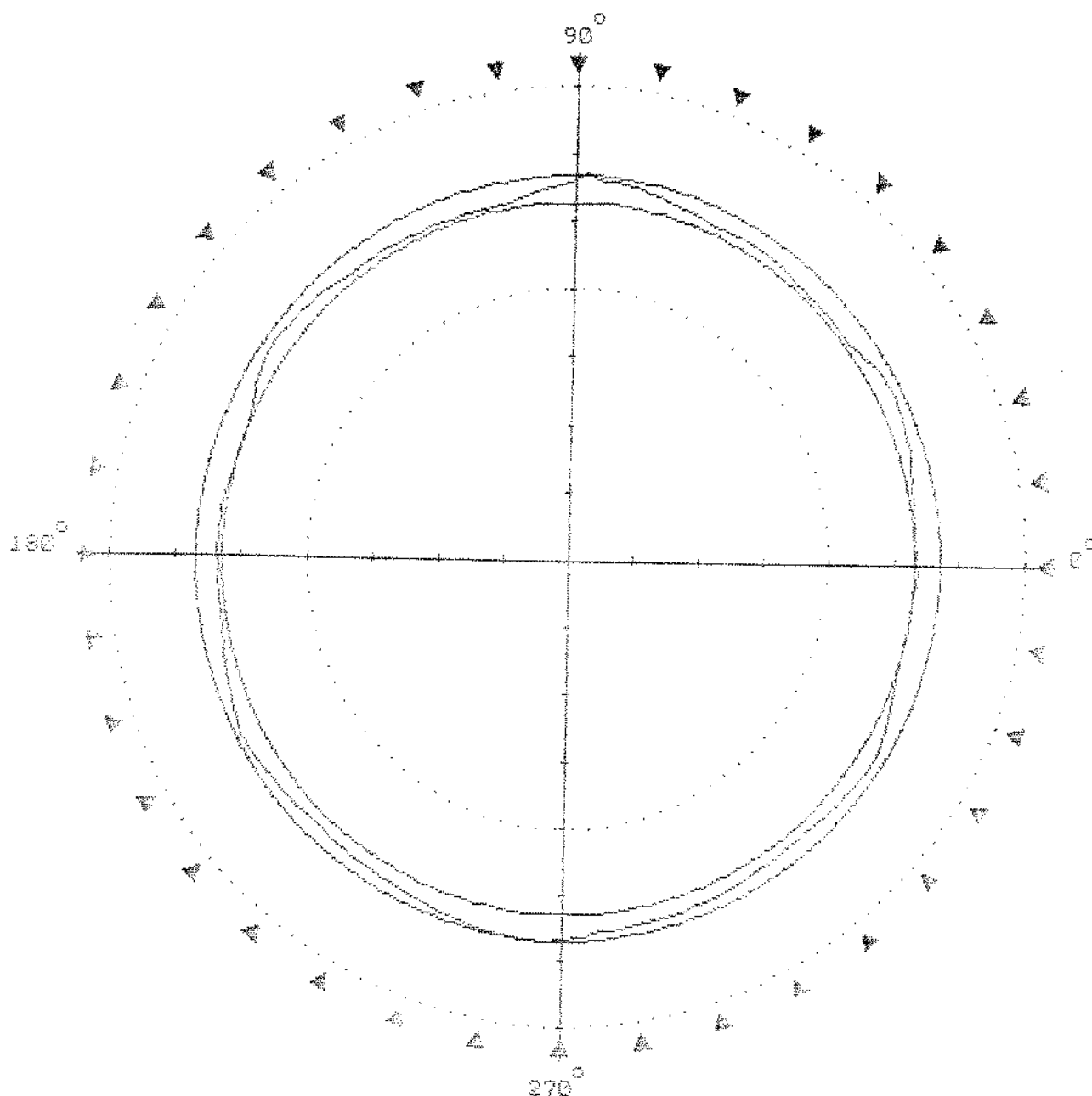


MZ ROUNDNESS RESULTS

75.004 um	Meas. mode	External
2.40 um	Z Height	0.0 mm
1.45 um	Filter	50 upr 20R
232.2 deg	Profile	100.0 %
4.20 um		
Datum : SPINDLE		

R  
 O  
 U  
 N  
 D  
 E  
 S  
 S

RTH TR3



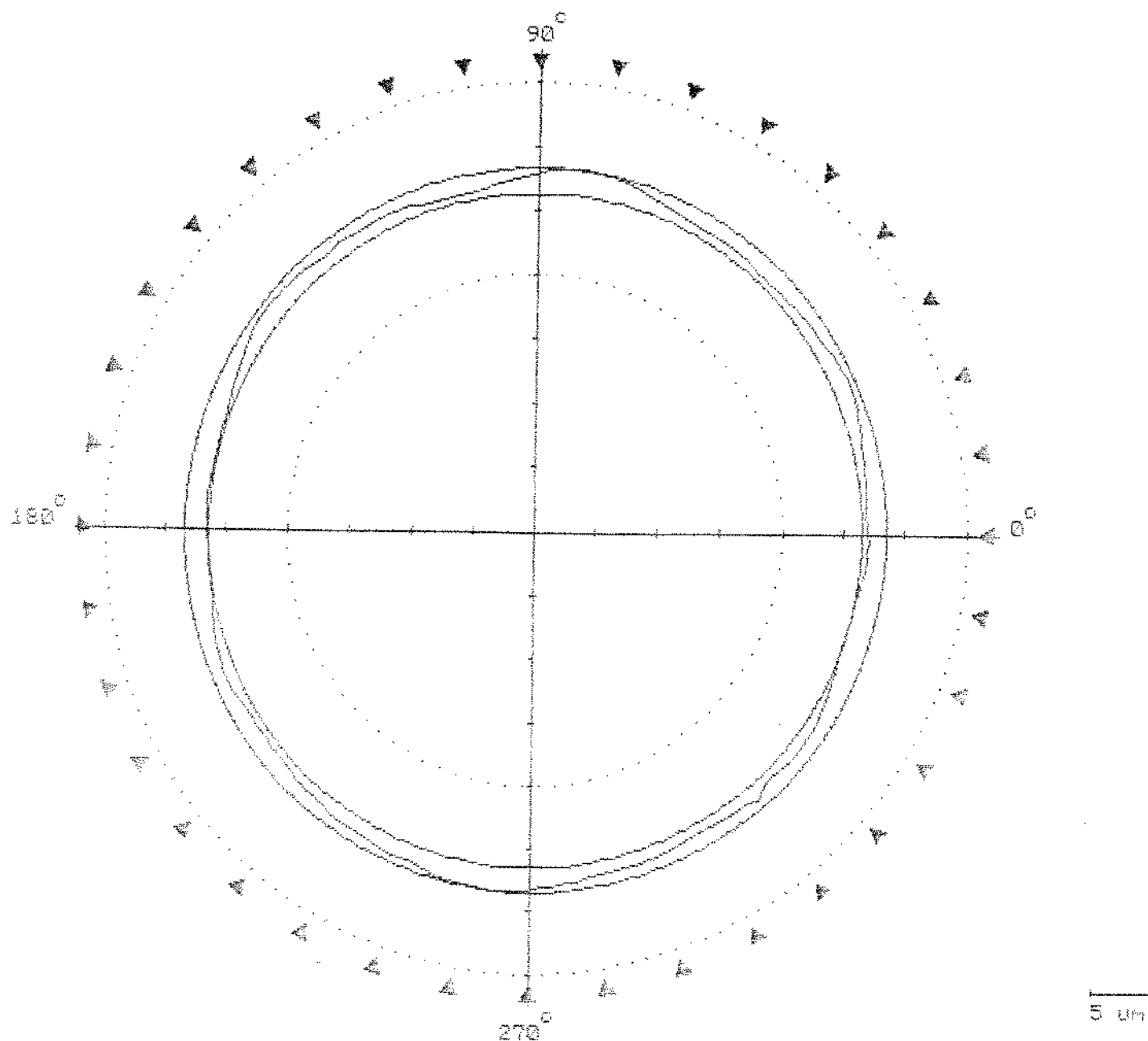
$d^2 \mathcal{L} / d\alpha^2 = 0$

### NZ ROUNDNESS RESULTS

75.025 um	Meas. mode	External
2.05 um	Z Height	3.0 mm
0.95 um	Filter	50 um 20R
224.9 deg	Profile	100.0 %
3.40 um		
Datum : SPINDLE		

ROZ

RTH TR3

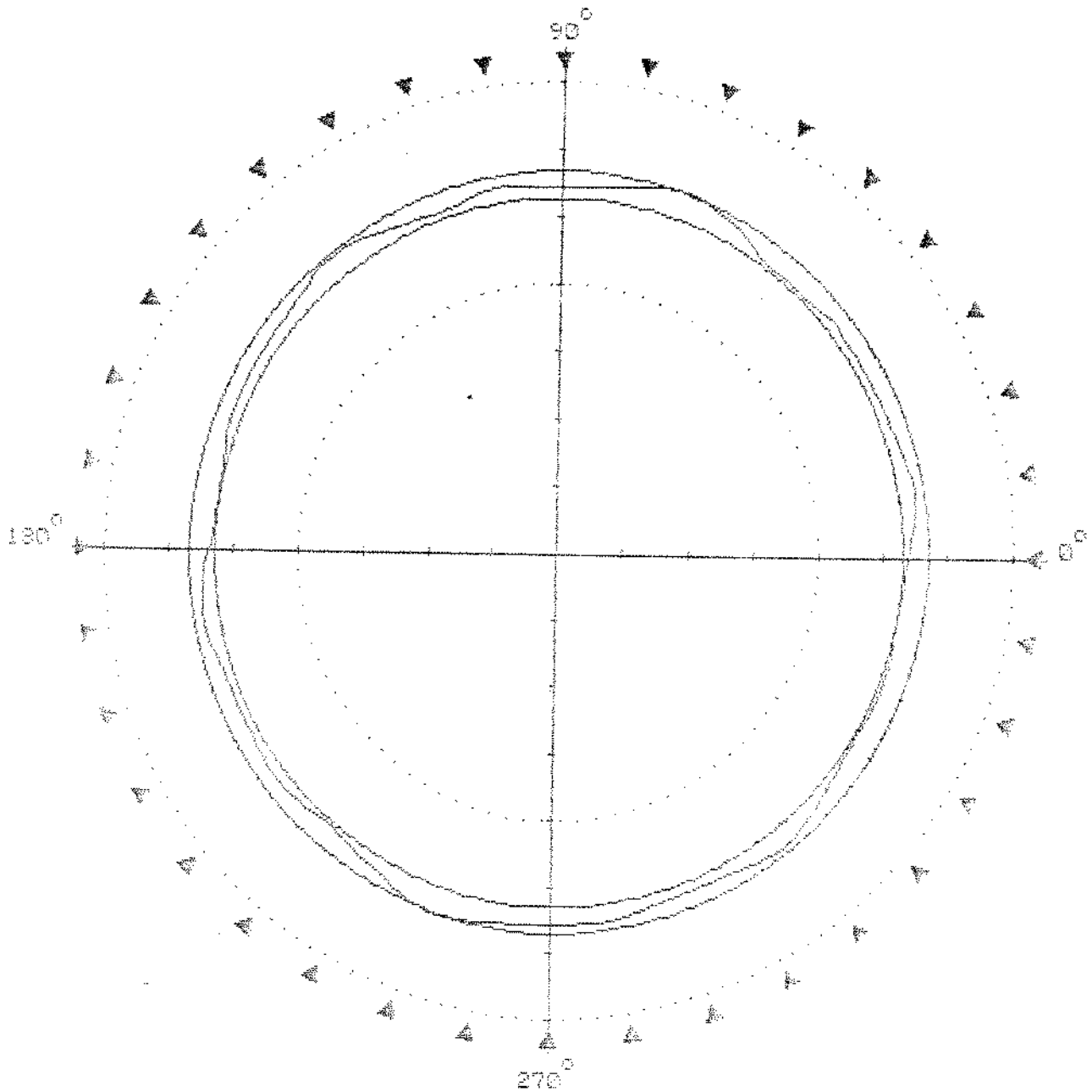


MZ ROUNDNESS RESULTS

75.005 mm	Meas. mode	External
2.00 μm	Z Height	10.0 mm
0.90 μm	Filter	50 upr 2CR
202.4 deg	Profile	100.0 %
3.10 μm		
Datum : SPINDLE		

R  
 O  
 U  
 N  
 D  
 N  
 E  
 S  
 S

RTH TR3



HZ ROUNDNESS RESULTS

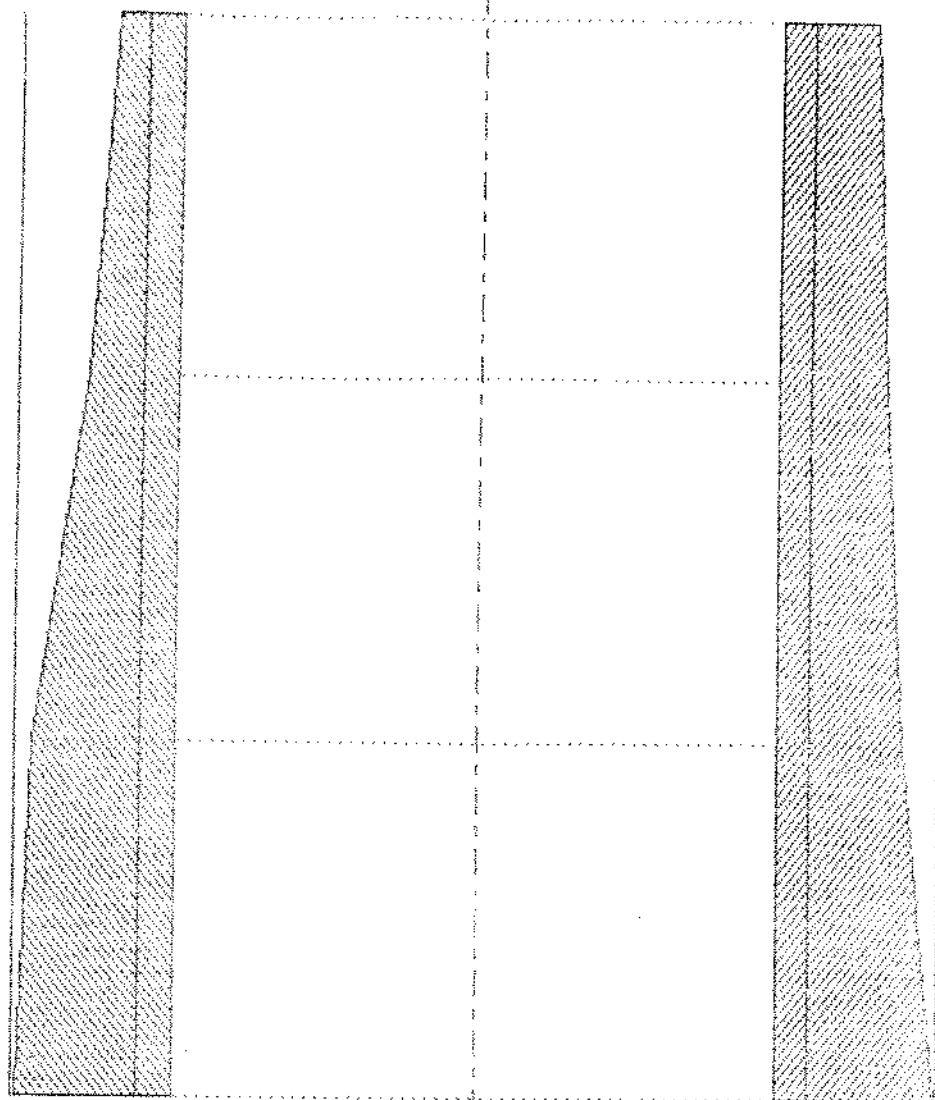
75.005 mm	Meas. mode	External
2.00 um	Z Height	15.0 mm
0.80 um	Filter	50 um 20R
131.3 deg	Profile	100.0 %
3.00 um		
Datum : SPINDLE		

RTH TR3

15.0 mm →

2 um

0.0 mm →



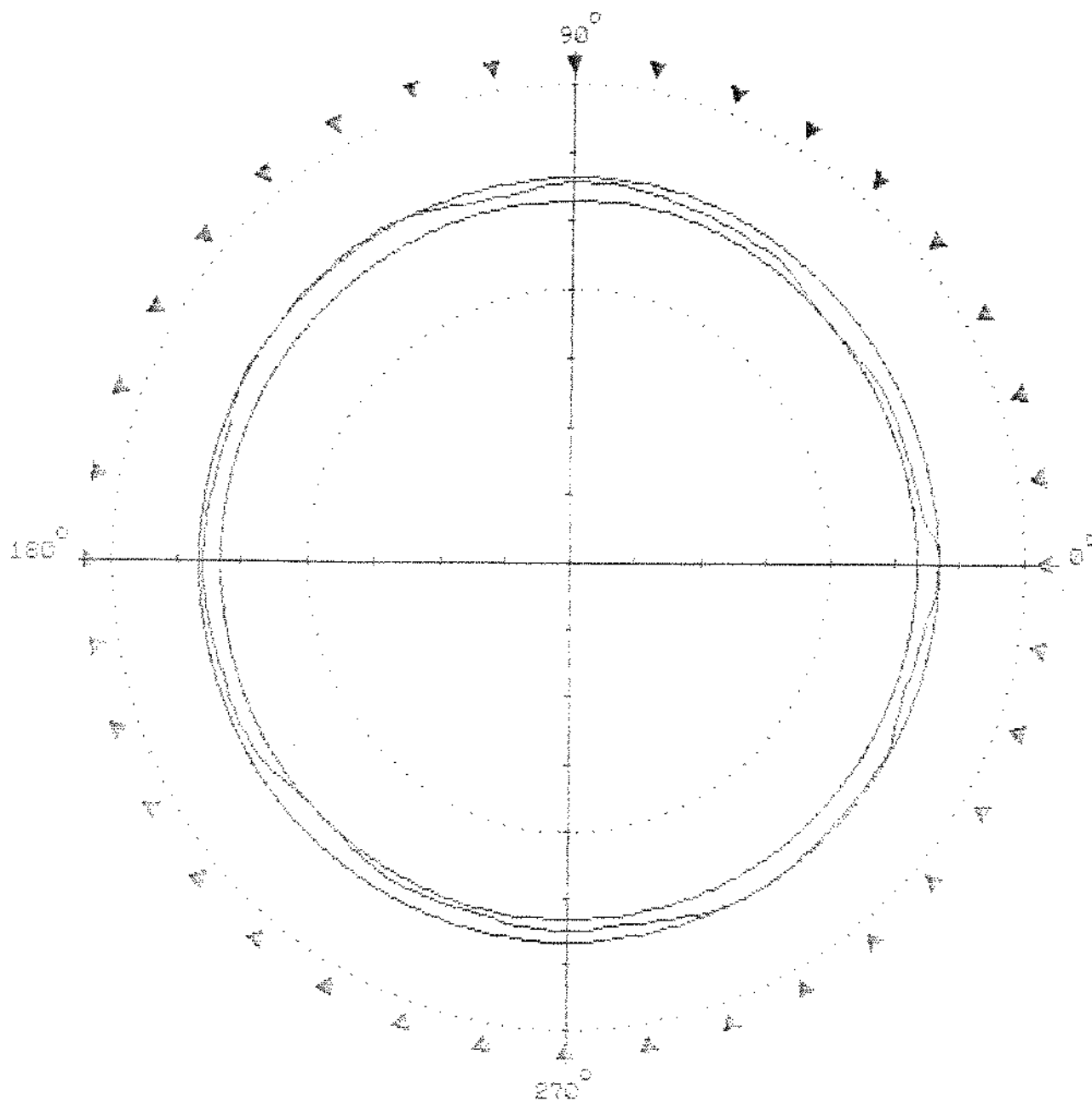
# MZ CYLINDER RESULTS

Peak to valley	3.22 um	Measurement mode	External
Max. parallelism	-4.16 um @ 153.6 deg	Number of planes	4
Current parallelism	-4.16 um @ 152.6 deg	Filter	50 um
①	8.55 um	Profile	100.0 %
②	7.25 um		

Datum : SPINDLE

RTH TR3





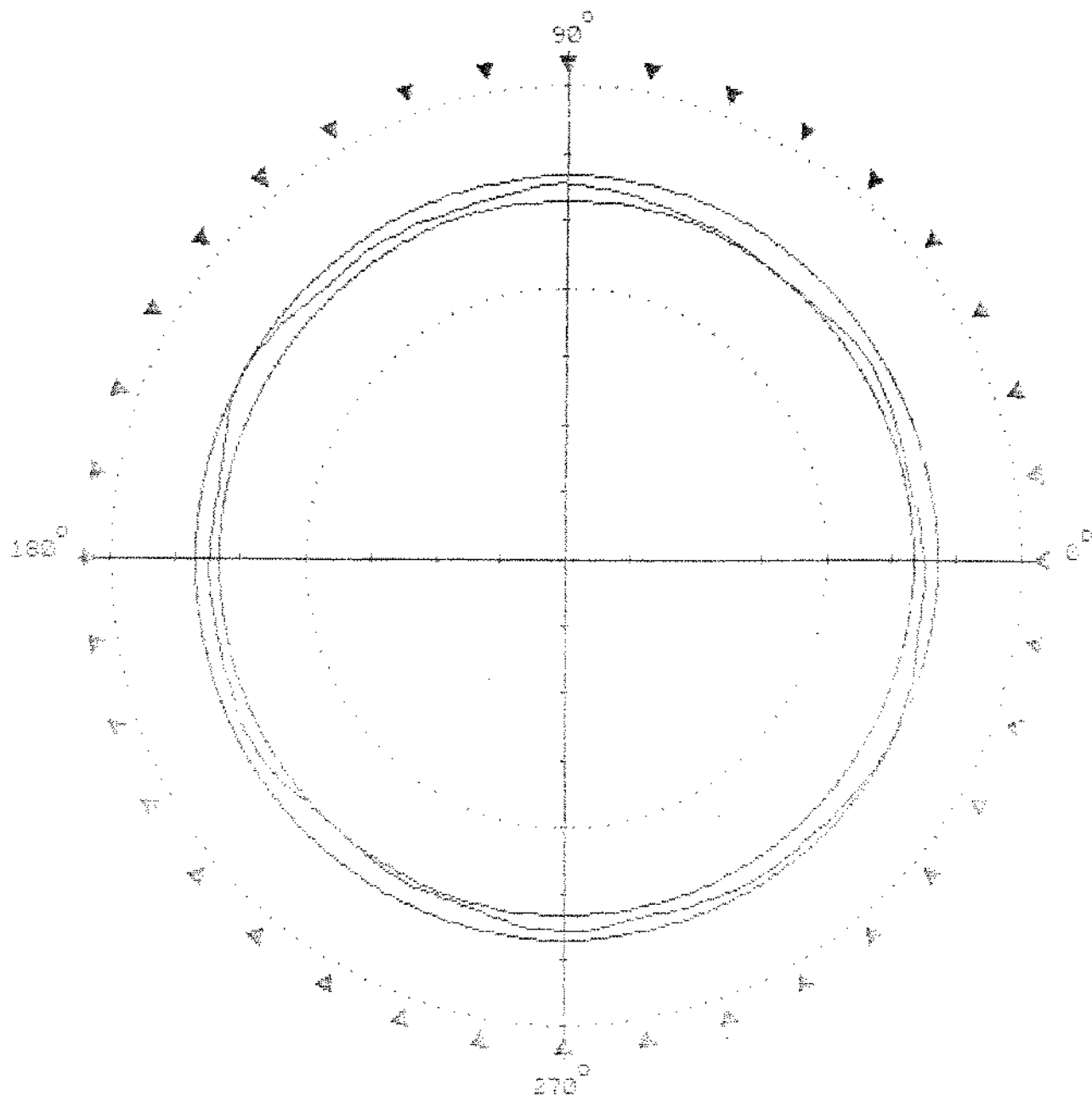
XYZ ROUNDNESS RESULTS

4.0315 mm	Meas. mode	External
1.90 um	Z Height	5.0 mm
3.60 um	Filter	50 um 20R
221.5 usg	Profile	100.0 %

Datum : SPINDLE

FOR

RTH TR3

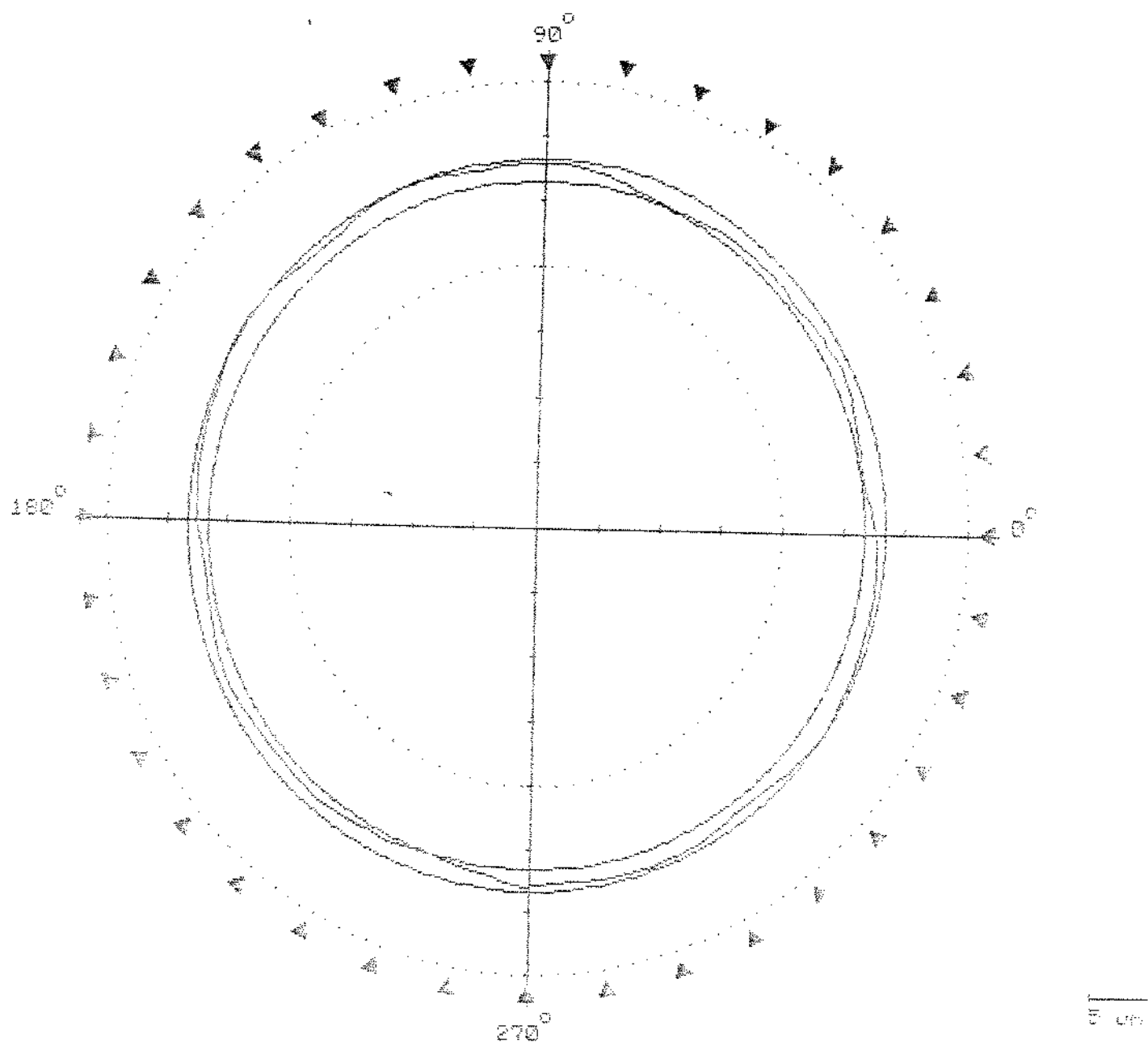


RO  
E  
Z  
A

M2 ROUNDNESS RESULTS

4.0019 mm	Meas. mode	External
1.85 um	Z Height	0.0 mm
3.45 um	Filter	50 um 20R
210.0 deg	Profile	100.0 %
7.65 um		
Datum : SPINDLE		

RTH TR3



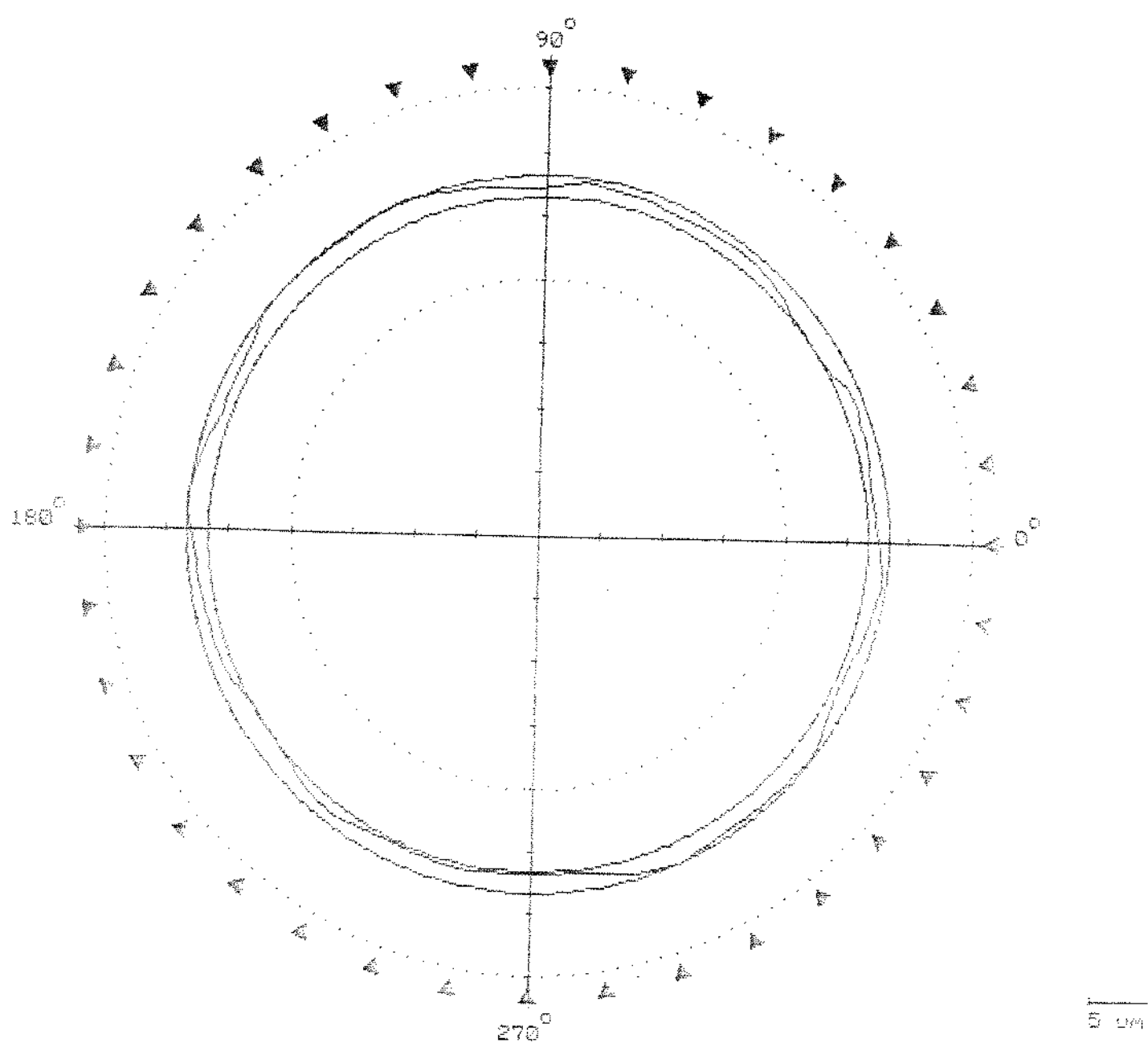
12Z ROUNDNESS RESULTS

4.0005 mm	Meas. mode	External
1.75 um	Z Height	10.0 mm
3.15 um	Filter	50 upr 20R
210.7 deg	Profile	100.0 %
6.95 um		

Datum : SPINDLE

120  
 110  
 100  
 90  
 80  
 70  
 60  
 50  
 40  
 30  
 20  
 10  
 0

RTH TR3



MZ ROUNDNESS RESULTS

4.0010 mm	Meas. mode	External
1.75 um	Z Height	15.0 mm
3.00 um	Filter	50 um 2CR
208.5 deg	Profile	100.0 %
7.25 um		
Datum : SPINDLE		

FOR  
VIEW

RTH TR3