

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

INFLUÊNCIA DO SULFETO DE MANGANÊS NA USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO MALEÁVEL PRETO FERRÍTICO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, PARA O OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA.

LOURIVAL BOEHS

FLORIANÓPOLIS, ABRIL DE 1979 .

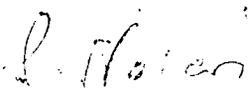
INFLUÊNCIA DO SULFETO DE MANGANÊS NA USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO MALEÁVEL PRETO FERRÍTICO

LOURIVAL BOEHS

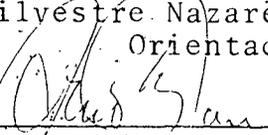
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO FABRICAÇÃO E, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO.

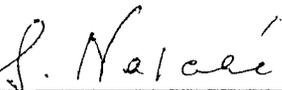


Silvestre Nazaré, Dr. Ing.
Orientador

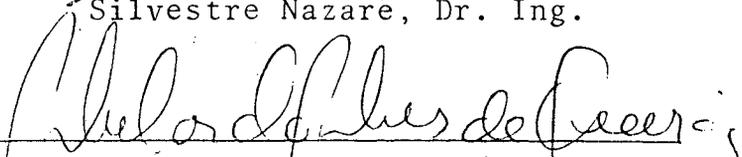


Arno Blass, Ph.D.
Coordenador do Curso

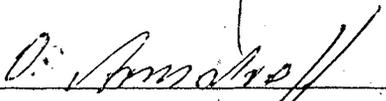
BANCA EXAMINADORA



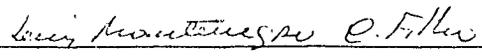
Silvestre Nazaré, Dr. Ing.



Abelardo Alves de Queiróz, MSc.



Ottomar Armstroff, Dr. Ing.



Luiz Montenegro Chaves Filho, MSc.

Aos meus pais, esposa e filho

AGRADECIMENTOS

- ao professor Silvestre Nazaré, pela orientação abnegada;
- à Universidade Federal de Santa Catarina e ao Departamento de Engenharia Mecânica, que possibilitaram a concretização deste trabalho;
- ao Acordo de Cooperação Técnica Brasil-República Federal da Alemanha e ao Convênio FINEP 394/CT, pela disponibilidade de equipamentos;
- à Fundação Tupy S.A., Joinville - S.C., que por intermédio do seu Centro de Pesquisas, forneceu o material pesquisado;
- à Brassinter S.A., São Paulo, pela doação das ferramentas usadas;
- ao professor Abelardo Alves de Queiróz, por sua colaboração;
- ao professor Berend Snoeijer, pela revisão deste trabalho;
- à todos que de alguma forma colaboraram para o bom andamento e concretização deste trabalho.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Definição e generalidades.....	3
2.1.1. Avaliação da usinabilidade.....	4
2.1.1.1. Vida da ferramenta ou critério de fim de vida.....	4
2.1.1.2. Desgaste de flanco e cratera.....	6
2.1.1.3. Mecanismos de desgaste.....	10
2.1.1.4. Acabamento superficial.....	17
2.1.1.5. Forças de corte.....	18
2.1.1.6. Formas de cavacos.....	18
2.2. Usinabilidade dos ferros fundidos.....	20
2.2.1. Caracterização dos ferros fundidos..	20
2.2.2. Influência da composição química na usinabilidade dos ferros fundidos...	22
2.2.3. Influência da microestrutura na usinabilidade dos ferros fundidos.....	28
2.2.4. Usinabilidade dos ferros fundidos maleáveis.....	30
3. EQUIPAMENTOS USADOS NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS, AFERIÇÕES.....	32

3.1. A máquina ferramenta.....	32
3.2. Ferramenta, porta-ferramenta e câmara de arrefecimento.....	33
3.3. Equipamento para medição das componentes da força de usinagem.....	34
3.4. Medidor de rotação da máquina ferramenta...	36
3.5. Sistema para a medição dos desgastes da ferramenta.....	39
3.6. Metalografia convencional e quantitativa, equipamentos usados.....	41
3.7. Máquinas usadas nos ensaios mecânicos.....	42
3.8. Aferições.....	43
4. MATERIAL USADO E SUA CARACTERIZAÇÃO.....	44
4.1. Forma dos corpos de prova, sua composição química e microestrutura.....	44
4.2. Propriedades mecânicas e físicas.....	49
4.3. Metalografia quantitativa.....	56
4.3.1. Fundamentação teórica da metalografia quantitativa.....	57
4.3.2. Aplicação da metalografia quantitativa na caracterização do material..	60
5. ENSAIOS DE USINABILIDADE.....	64
5.1. Procedimento dos ensaios e caracterização dos parâmetros usados.....	64
5.2. Resultados experimentais e sua análise.....	67
6. CONCLUSÕES.....	92
7. BIBLIOGRAFIA E APÊNDICE.....	93

RESUMO

O presente trabalho trata da influência do MnS na usinabilidade do ferro fundido maleável preto ferrítico. Usou-se três composições deste ferro, variando-se a porcentagem de enxofre (0,220, 0,093 e 0,028%) e manganês (0,58, 0,38 e 0,29%). A usinabilidade do material foi avaliada pela vida da ferramenta, em ensaios de torneamento de longa duração, realizados em quatro velocidades de corte (140, 181, 224 e 250 m/min). No material de maior porcentagem de MnS e para as velocidades de 140 e 181 m/min, obteve-se um considerável aumento na vida da ferramenta, 220 e 230%, respectivamente.

ABSTRACT

The present work deals with the influence of MnS on the machinability of malleable ferritic cast iron. The experiments were carried-out on three iron samples with different composition by varying the percentage of sulfur (0,220, 0,093 and 0,028%) and manganese (0,58, 0,38 and 0,29%). The cutting properties were related to the life of the cutting tool on long time cutting tests and four cutting velocities (140, 181, 224 and 250 m/min). It was observed considerable increase in life of cutting-tools (220 and 230%) with materials with greatest percentage of MnS and cutting velocities of 140 and 181 m/min.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico tende cada vez mais racionalizar e aumentar a produção de ferramentas, máquinas, ferramentas e materiais. A indústria manufatureira, responsável pela transformação do material bruto em peças acabadas, por conformação com remoção de cavacos, está interessada em informações que levam a uma usinagem mais econômica. Esta exigência é válida, pois com o conhecimento das condições econômicas de corte, a operação pode ser realizada, baseada em menor tempo e custo de fabricação.

São numerosos os fatores que tem influência na usinabilidade de um determinado material, por exemplo: condições de corte, geometria da ferramenta, propriedades mecânicas e físico-químicas da peça e da ferramenta. Entre estes, o último se apresenta mais influente na descrição da usinabilidade.

Já foram realizadas diversas pesquisas (1) para determinar a influência do manganês e do enxofre (combinados, formam o sulfeto de manganês) na usinabilidade dos aços, principalmente nos aços denominados de usinagem fácil. Os resultados revelaram praticamente em todos os casos estudados, um efeito benéfico destas inclusões na usinabilidade, isto, através da forma do cavaco ou na vida da ferramenta.

Até o presente, quase nenhuma informação existe relacionada com a influência dos sulfetos de manganês (MnS) na usinabilidade dos ferros fundidos. Mesmo desconhecendo o efeito real dos MnS no ferro fundido, os fundidores costumam fundir ferros fundidos com maior percentagem de manganês e enxofre na sua composição, procurando obter um efeito semelhante ao dos MnS nos aços.

O presente trabalho, tem por objetivo determi-

nar a influência dos sulfetos de manganês na usinabilidade do ferro fundido maleável preto ferrítico. A matriz ferrítica foi escolhida tendo por finalidade evitar complexidades na microestrutura.

A pesquisa foi desenvolvida tendo-se usado como processo de usinagem, o torneamento de corpos de prova de forma cilíndrica. Foram usadas quatro velocidades diferentes (140, 181, 224 e 250 m/min) e mantidos constantes o avanço e a profundidade de corte (0,25 e 2,0 mm, respectivamente).

O material estudado era composto de três composições bem distintas de manganês (0,58%, 0,38% e 0,29%) e de enxofre (0,22%, 0,093% e 0,028%), sendo a relação Mn/S de: 2,7, 4,1 e 10,4, respectivamente. Procurou-se manter os demais elementos de liga constantes para não ofuscar o efeito dos MnS.

A usinabilidade do material foi avaliada pela vida da ferramenta de corte, ou seja, pelo desgaste da superfície de incidência, também conhecido como desgaste de flanco.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Definição e generalidades

A usinabilidade pode ser definida como o comportamento de um determinado material quando submetido a conformação com remoção de cavacos (2). Esta propriedade é melhor quando (3): o tempo de usinagem para a remoção de um determinado volume de material diminui, a qualidade da superfície melhora, a energia necessária diminui, a forma dos cavacos é adequada e quando a vida da ferramenta aumenta.

As pesquisas de usinabilidade tiveram início no começo deste século, quando F. W. Taylor usinou toneladas de materiais, tendo como objetivo quantificar a sua usinabilidade (4). O progresso alcançado durante todas estas décadas, não foi suficiente para definir com clareza, um índice. As informações que existem disponíveis atualmente, na maioria dos casos, foram determinadas em função (4, 5, 6, 7, 8, 9): das forças de corte, do acabamento superficial da peça, da forma do cavaco e da vida da ferramenta. Estas grandezas dependem basicamente, dos aspectos metalúrgicos do par peça ferramenta, da geometria da ferramenta e das condições de corte (4). A forma da ferramenta, nos diferentes processos de usinagem, de um mesmo material, leva a diferentes formas geométricas de corte (5). Isto implica que, para: o torneamento, o fresamento, a furação, a retificação e outros processos de usinagem, a rigor, deve ser feita a própria avaliação da usinabilidade.

O maior número de informações disponíveis a-

tualmente (5), são para o torneamento, devido principalmente a larga utilização deste processo e a facilidade na obtenção de dados experimentais.

2.1.1. Avaliação da usinabilidade

Desde que Taylor publicou em 1906 o resultado da primeira grande pesquisa sobre usinabilidade, muitos métodos foram propostos, testados e usados. A maioria deles tinha como finalidade, simplificar e reduzir o custo dos ensaios, evitando com isto, que se usinasse toneladas de materiais como o fizera Taylor (10).

Ao se realizar os ensaios de usinabilidade, após um certo tempo de corte, geralmente é constatado um ou uma associação dos seguintes fenômenos (5):

- na ferramenta: atinge um determinado desgaste, deforma-se plasticamente ou quebra;
- na peça: há uma variação das dimensões e redução da qualidade do acabamento superficial;
- no par peça-ferramenta: verifica-se um aumento na força de usinagem, com conseqüente elevação da temperatura na região de remoção do cavaco.

A figura 1 (diagrama de blocos), permite fazer uma análise sistemática da avaliação da usinabilidade, fatores que influem na vida da ferramenta e mecanismos de desgaste.

2.1.1.1. Vida da ferramenta ou critérios de fim de vida

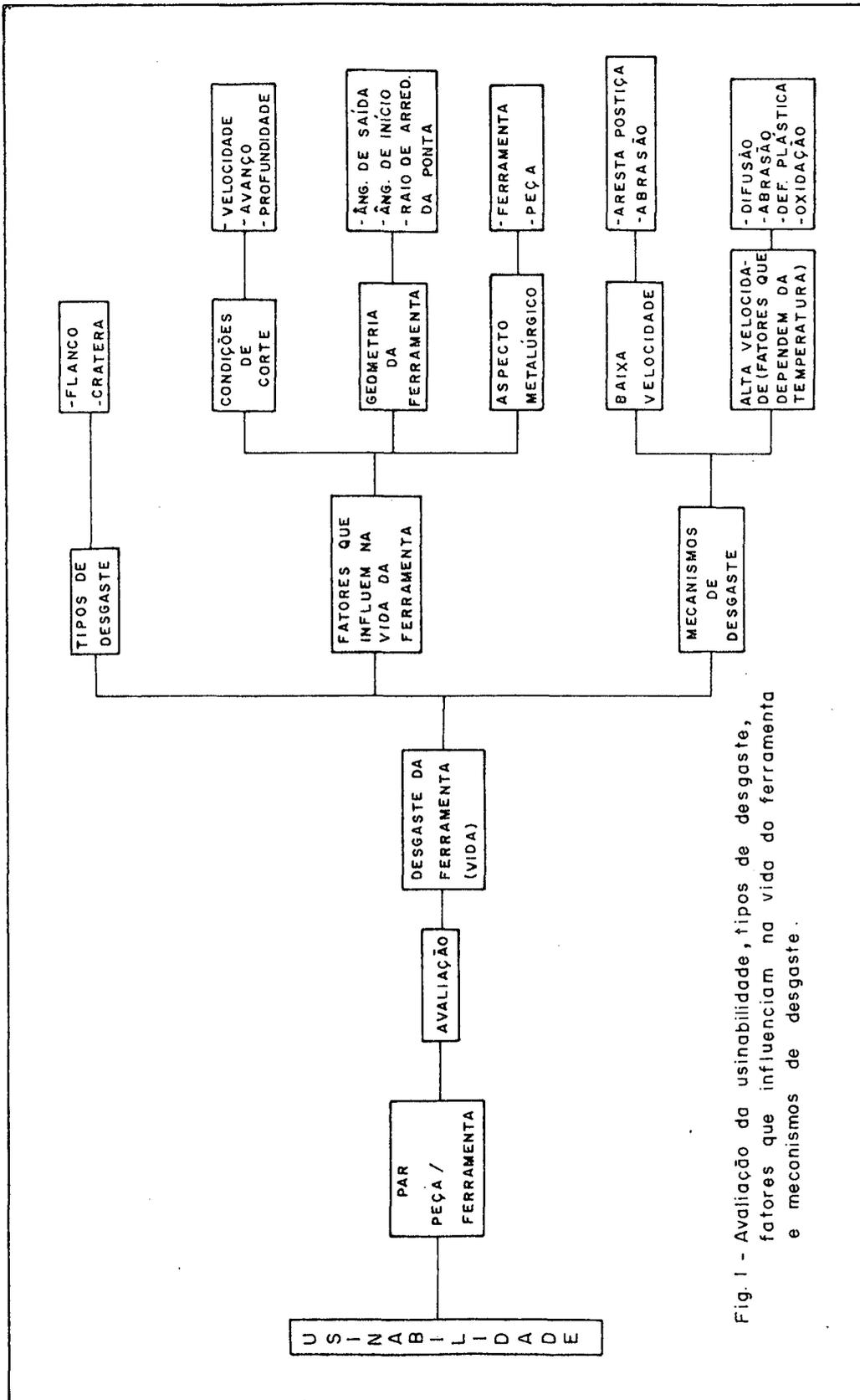


Fig. 1 - Avaliação da usinabilidade, tipos de desgaste, fatores que influenciam na vida do ferramenta e mecanismos de desgaste.

Como critério de fim de vida da ferramenta, pode ser usado: o tempo de corte, o volume de material cortado ou número de peças fabricadas. Entretanto, quando se deseja determinar as curvas de vida de uma ferramenta, para um determinado material, com uma precisão razoável, deve-se recorrer aos ensaios de usinagem de longa duração (4). Nestes ensaios, a aresta cortante da ferramenta, trabalha em condições normais de corte e é usada até que seu desgaste, previamente fixado, seja tal que leva a sua substituição. O tempo de ensaio é longo e o consumo do material elevado.

Antes de qualquer consideração relacionada com a equação de vida da ferramenta, é essencial que o fim da vida seja especificado. Em geral, o fim de vida pode ser atribuído às seguintes causas (11): ao desgaste do flanco (desgaste da superfície de incidência), ao desgaste da superfície de saída (desgaste de cratera), a deformação plástica da aresta cortante e, ao desgaste térmico e mecânico da aresta principal de corte.

As duas últimas geralmente levam a ferramenta ao colapso total e, por esta razão, o desgaste de flanco e cratera, são usados como critérios de fim de vida. Para evitar que a ferramenta atinja o colapso total, é fundamental que sejam estipulados valores limites para o desgaste de flanco e cratera (11). Os principais responsáveis pelos citados desgastes são: a velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, ângulos da ferramenta, raio de arredondamento da ponta, aspectos metalúrgicos da peça e da ferramenta, bem como a rigidez da máquina ferramenta (4, 12). A rigidez da máquina ferramenta também contribui significativamente na qualidade do acabamento superficial e dimensional da peça (12).

2.1.1.2. Desgaste de flanco e cratera

A figura 2 (13, 14), apresenta esquematicamen-

te o desgaste de flanco e cratera.

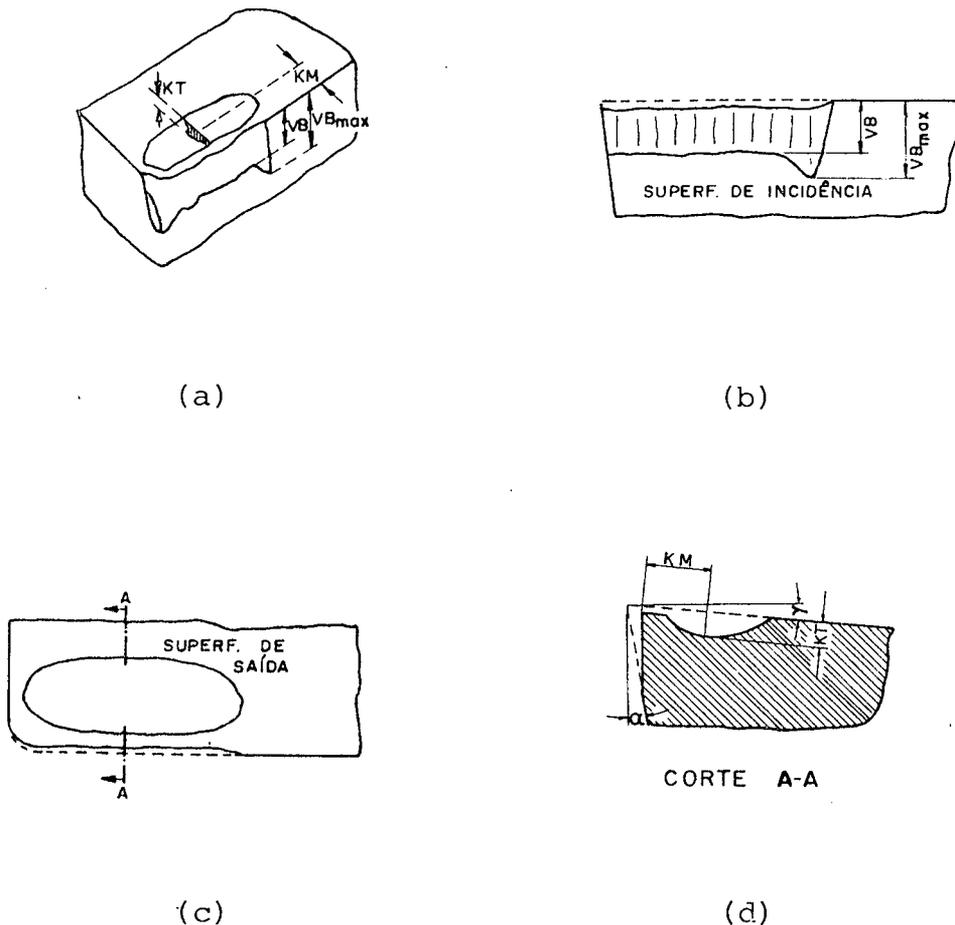


Fig. 2 - Localização do desgaste de flanco e cratera em uma ferramenta de torneamento.

Na figura 2, "a" e "b", VB representa o desgaste médio de flanco ou da superfície de incidência, e $VB_{\text{máx}}$, o desgaste máximo que ocorre na referida superfície. Na figura 2, "a" e "d", KT e KM, respectivamente, a profundidade e a distância do centro da cratera à aresta principal de corte. O desenvolvimento do desgaste de flanco e cratera estão representados esquematicamente na figura 3 (11).

O desgaste de flanco (figura 3, "a") geralmente

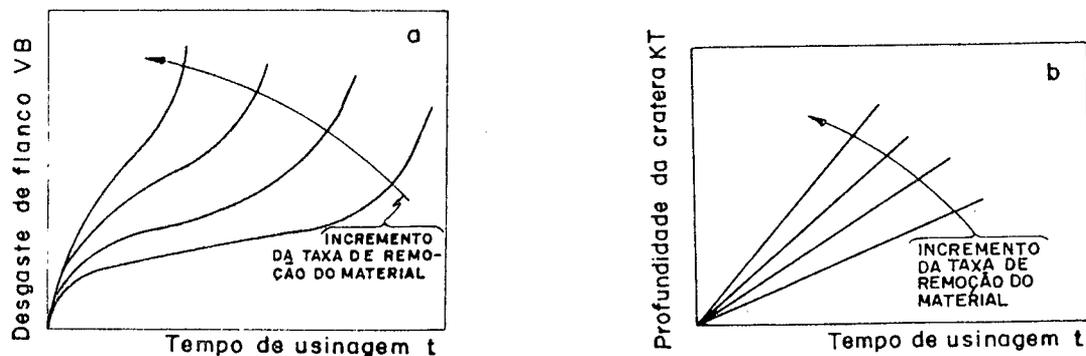


Fig. 3 - Desenvolvimento do desgaste de flanco e cratera, em função do tempo de usinagem e da taxa de remoção do material.

te aumenta rapidamente no início do corte, passando a seguir por uma fase relativamente estável (fase durante a qual ocorre pequeno desgaste). Após um tempo de corte mais prolongado, o desgaste começa a aumentar novamente com maior intensidade.

A profundidade da cratera (figura 3, "b") geralmente aumenta proporcionalmente com o aumento do tempo de usinagem. Ambos os desgastes aumentam consideravelmente com o aumento da taxa de remoção do material. Aumentar a taxa de remoção de material, significa aumentar a velocidade de corte, avanço ou profundidade, isoladamente, ou uma combinação destes parâmetros.

Os valores admitidos para os desgastes da ferramenta (critério de fim de vida), podem variar de autor para autor. Uma das razões para esta variação, deve-se aos diferentes tipos de usinagem: desbaste leve ou pesado ou usinagem de acabamento.

A seguir, serão apresentados alguns valores para o desgaste de flanco e de cratera, segundo diversos autores.

Para ferramentas de metal duro e pastilhas cerâmicas, são admitidos os seguintes valores (11):

$$VB = 0,38 \text{ mm}$$

$$VB_{\text{m\acute{a}x}} = 0,76 \text{ mm}$$

$$KT = 0,004 + 0,3.s; \quad s = \text{avanço (mm/rotação)}$$

Outros pesquisadores (15), admitem o desgaste da superfície de incidência entre certos valores limites, que variam em função do tipo de usinagem:

a - $VB = 0,25$ a $0,38$ mm - para operações de acabamento ou usinagem de precisão;

b - $VB = 0,38$ a $0,75$ mm - para operações de desbaste;

c - $VB = 0,8$ a $1,2$ mm - para operações de esboçar (desbaste pesado).

Os mesmos autores (15), afirmam que os valores "a" e "b" proporcionam uma margem de segurança para evitar a quebra brutal da ferramenta. O desgaste na superfície de incidência é raramente uniforme sobre toda a superfície, por isso torna-se conveniente fazer uma distinção entre o desgaste médio e máximo, VB e $VB_{\text{m\acute{a}x}}$, respectivamente. O desgaste excessivo da ferramenta proporciona uma superfície usinada cheia de rugosidades, devido o arrancamento do metal, a ferramenta se aquece e perde a sua resistência a elementos abrasivos da peça. Devido o aquecimento, a peça também fica sujeita a deformações (15).

Em pesquisa de usinabilidade com ferro fundido maleável (16), foi usado como critério de fim de vida da ferramenta, VB igual a $0,38$ mm. Já para o ferro fundido nodular (15), foi usado como critério de fim de vida, a relação KT/KM igual a $0,30$. O desgaste da superfície de incidência para os ensaios com o ferro nodular foi inferior a $0,35$ mm.

O sulco produzido na superfície de saída, é resultante do forte contato entre esta superfície e o cavaco. Por esta razão, recomenda-se que a relação KT/KM não ultrapasse a $0,30$, para evitar a possibilidade de ruptura da ferramenta. Em face disto, tem-se a previsão de que a ferramenta tem uma reserva na duração de corte da ordem de 30%, em relação a uma possível ruptura (17). Recomenda-se ainda (17) que, a fim de evitar um excessivo aquecimento devido o atrito entre a su

perfície de incidência e a peça, que $VB_{m\acute{a}x}$ não seja superior a 1,0 mm.

No torneamento de ferros fundidos maleáveis com ferramenta de metal duro, podem ser usados ambos os critérios (17), isto é, da superfície de incidência e da superfície de saída, para definir o fim de vida da ferramenta. Os valores limites para estes desgastes dependem do tipo da operação de usinagem. Para operações de acabamento, VB deve ser usado entre 0,2 e 0,4 mm e, para desbaste, 0,6 a 1,0 mm. O desgaste de cratera, a relação KT/KM deve ser usada igual a 0,25 para cortes intermitentes e 0,35 para cortes contínuos (18).

2.1.1.3. Mecanismos de desgaste

A usinagem é um processo de conformação que se desenvolve em condições muito severas de deformação plástica e atrito, sendo por este motivo, fonte de intenso calor (10).

A figura 4 (19), mostra as zonas de geração de calor.

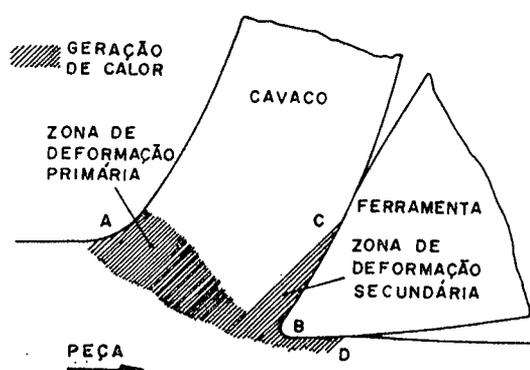


Fig. 4 - Zonas de deformação e geração de calor, em um processo de usinagem.

- a - na região AB ocorre deformação plástica primária (região de cisalhamento);
- b - na região BC ocorre deformação plástica secundária e atrito na superfície de saída;
- c - na região BD ocorre significativo atrito entre a superfície de incidência e a superfície usinada da peça.

Na usinagem de ferro fundido com ferramenta de metal duro e velocidade de corte de 100 mm/min, do total do calor gerado pelo corte, cerca de 50% é dissipado pela peça, 42% pelo cavaco, 2% pela ferramenta e 6% pelo ambiente (4).

A figura 5 (4), permite visualizar as condições reinantes na interface peça-ferramenta-cavaco, para usinagem do aço ABNT 1045, com ferramenta de metal duro P20 e velocidade de corte de 160 m/min.

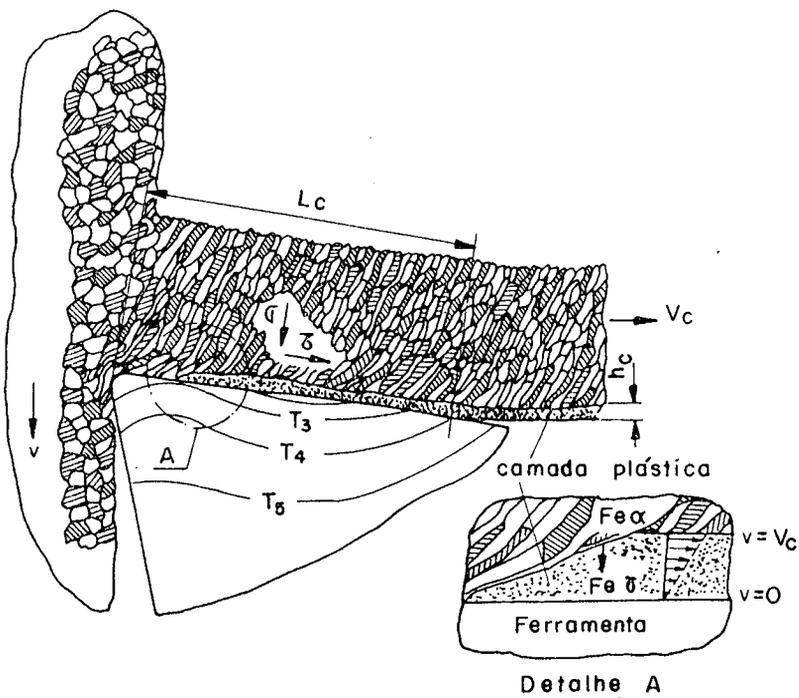


Fig. 5 - Condições reinantes na superfície de saída da ferramenta; material ABNT 1045, ferramenta P20, $s = 0,25$ mm/rot e $a = 2,0$ mm.

- L_c - comprimento da região de contato entre cavaco e ferramenta.
 σ - tensão normal.
 τ - tensão cisalhante.
 v - velocidade de corte.
 V_c - velocidade do cavaco.
 T_3, T_4 e T_5 - isothermas.
 h_c - camada plástica.
 Fe_α e Fe_γ - estruturas alotrópicas.

Na zona onde ocorre o contato das superfícies metálicas puras, num estado altamente ativo, devido as condições de deformação plástica, as temperaturas podem ser superiores a 1270°K (1000°C). As deformações e temperatura são de tal ordem, que junto a superfície de saída, há uma camada (h_c) onde a estrutura alotrópica α muda para γ . O efeito da alta temperatura na interface cavaco-peça-ferramenta, de certa forma é benéfico, pois melhora o acabamento e diminui a resistência mecânica da peça. Na ferramenta, no entanto, o acréscimo de temperatura é responsável pela mudança do mecanismo de desgaste (10).

O desgaste da ferramenta geralmente é atribuído a adesão, abrasão, oxidação ou difusão (20). A figura 6 (21) mostra estes desgastes, esquematicamente, em função da temperatura ou velocidade de corte.

As análises realizadas nos cavacos e nas ferramentas desgastadas levaram a concluir que nas baixas e médias velocidades, o desgaste é maior na superfície de incidência, tendo como origem o cisalhamento da aresta postiça de corte. Esta aresta é constituída de partículas do material usinado, que se acumulam na superfície de saída da ferramenta (4). Quando se trabalha com velocidades maiores, o desgaste aumenta rapidamente devido as reações resultantes da difusão que ocorre entre o cavaco e a ferramenta, principalmente na superfície de saída, fazendo com que o desgaste de cratera seja predominante (21).

Mesmo em condições normais de corte, o aquecimento da ferramenta junto à aresta cortante, é suficientemen-

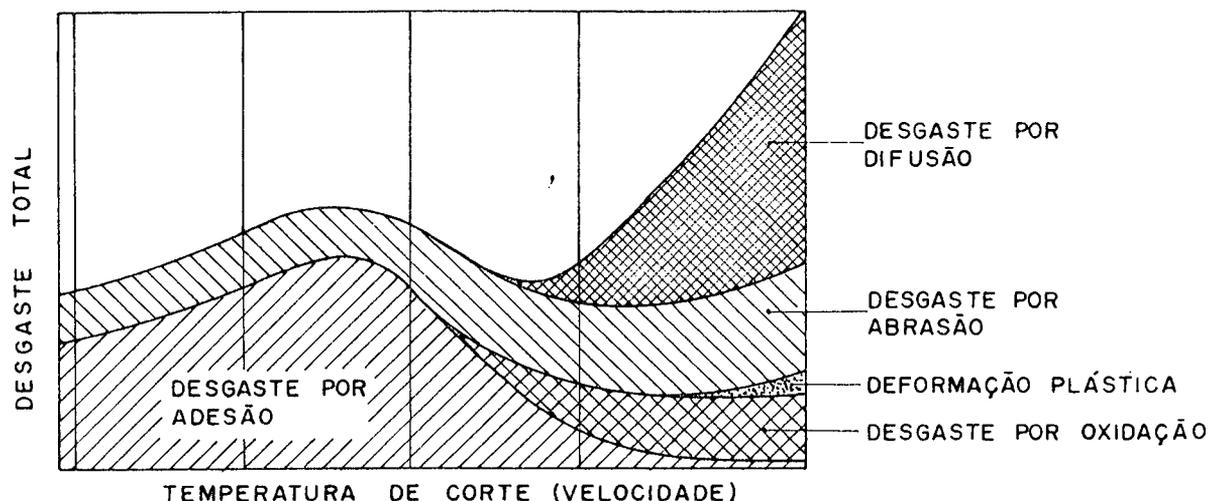


Fig. 6 - Mecanismos de desgaste de uma ferramenta, em função da temperatura ou velocidade de corte.

te alta para a formação de uma película de óxido (4). Imediatamente abaixo da marca de desgaste da superfície de incidência, não se observa nenhuma oxidação, apesar da alta temperatura ali reinante durante a usinagem. Isto se deve a geometria da ferramenta, que é responsável pela formação de uma pequena fresta em forma de cunha, por onde penetra o oxigênio do ar reagindo com as superfícies de corte que se encontram em estado nascente. Permanecendo assim uma atmosfera rica em nitrogênio que impede a oxidação nas imediações da marca de desgaste. Outras oxidações são observadas na superfície de saída e próximo da aresta lateral de corte (4).

A oxidação dos metais duros tem início para temperaturas da ordem de 970°K (700°C) a 1070°K (800°) (22). A figura 7 (4) apresenta esquematicamente as possíveis regiões de oxidação.

O desgaste por abrasão é um fenômeno que está presente mesmo nas baixas temperaturas ou velocidades, no entanto é mais significativo nas altas. Este desgaste pode ser atribuído ao amolecimento do material da ferramenta em função do aumento da temperatura. A figura 8 (23), permite analisar a influência da temperatura na dureza dos TiC , TaC , NbC e WC .

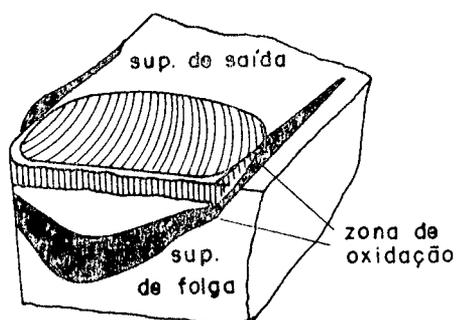


Fig. 7 - Possíveis regiões de oxidação de uma ferramenta.

Um aumento na temperatura de 670°K (400°C) para 1070°K (800°C), reduz a dureza do carboneto de tungstênio (WC) de 1000 Hv para 400 Hv. Os ensaios de dureza foram realizados com cargas de 3 N ($P = 3 \text{ N}$). Para as temperaturas acima mencionadas, os carbonetos de: titânio, tântalo e nióbio, apresentam o dobro da dureza que a do carboneto de tungstênio.

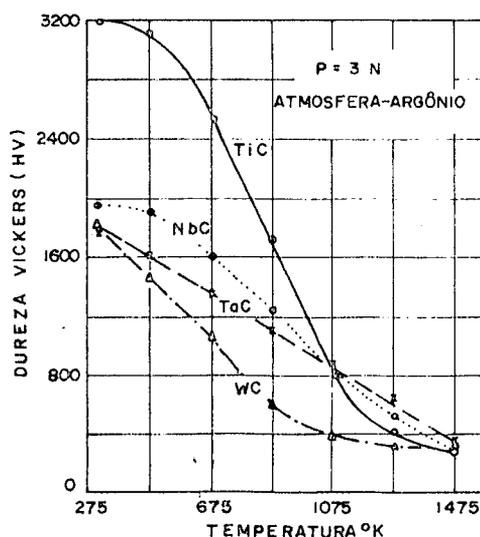


Fig. 8 - Influência da temperatura na dureza dos carbonetos de: Ti, Ta, Nb e W.

Dois pesquisadores alemães (22) realizaram uma série de pesquisas com a finalidade de determinar as reações de difusão que ocorrem entre o cobalto da ferramenta e o ferro do cavaco. A figura 9 (22) representa esquematicamente esta reação de difusão.

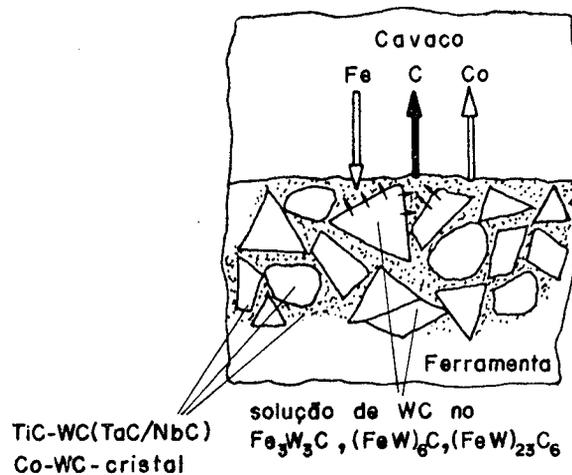


Fig. 9 - Reação de difusão entre o ferro e o cobalto e entre o cobalto e o ferro.

Segundo estes pesquisadores (22), os seguintes fatos podem explicar esta difusão:

- difusão do ferro na fase cobalto;
- difusão do cobalto no ferro, de forma que o ferro e o cobalto formam uma solução sólida contínua;
- solução de carboneto de tungstênio na forma de carbonetos duplos do tipo: Fe_3C W_3C , $(FeW)_6C$, $(FeW)_{23}C_6$;
- carbonetos livres, como o WC, da ferramenta de carboneto, se dissolvem e difundem na direção do ferro.

Pesquisas realizadas (22) revelaram que a profundidade de difusão está fortemente relacionada com a temperatura. A figura 10 (22) mostra a relação que existe entre a temperatura e a profundidade de difusão.

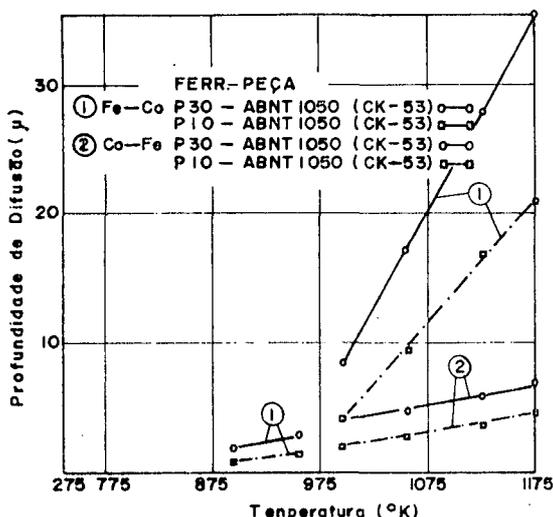


Fig 10 - Influência da temperatura na profundidade de difusão do ferro no cobalto e do cobalto no ferro, para ferramentas de metal duro da classe P em contato com o aço ABNT 1050.

Os resultados experimentais apresentados na figura 10, foram obtidos em ensaios estáticos, com ferramentas de metal duro P10 e P30, em contato com o aço ABNT 1050 (ck-53). Verifica-se que para temperaturas superiores a 970°K (700°C), a profundidade de difusão do ferro no cobalto é consideravelmente aumentada com o aumento da temperatura. A difusão do cobalto no ferro é pouco sensível a temperatura.

A figura 11 (22) apresenta os resultados experimentais da influência da temperatura na profundidade de difusão do ferro no cobalto e do cobalto no ferro, para ferramentas com valores crescentes de TiC e TaC.

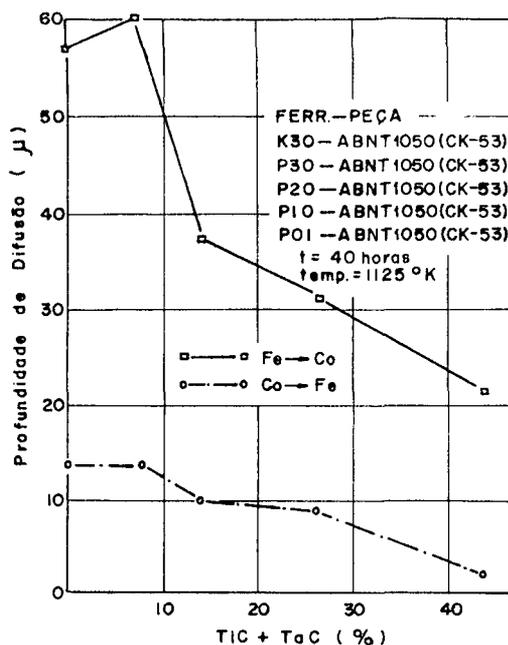


FIG. 11 - Influência dos carbonetos de Ti e Ta na profundidade de difusão do ferro no cobalto e do cobalto no ferro, para ferramentas das classes K e P em contato com o aço ABNT 1050.

Os ensaios foram realizados estaticamente, com ferramentas de metal duro K30, P30, P20, P10 e P01 em contato com o aço ABNT 1050 (Ck-53). Os resultados revelaram que para um aumento de 10 para 40% de TiC e TaC na composição das ferramentas, há uma redução da ordem de 100% na profundidade de difusão do ferro no cobalto. A difusão do cobalto no ferro é pequena e se apresenta pouco sensível ao aumento de TiC e TaC.

2.1.1.4. Acabamento superficial

O acabamento superficial de uma peça usinada é determinado em função da precisão dimensional e da rugosidade

da superfície. Ambas são baseadas na tolerância pré-fixada da peça. Um material de maior resistência associado a uma maior velocidade de corte, permitem a obtenção de peças com melhor acabamento superficial. Se o material é de pequena resistência ou a velocidade de corte muito baixa, o material será arrancado durante a operação de usinagem e a peça apresentará em sua superfície uma série de microtrincas (15).

2.1.1.5. Forças de corte

Para a formação de um cavaco, torna-se importante o conhecimento da força resultante ou força de usinagem (F). O conhecimento da sua magnitude e direção são informações valiosas para os projetistas de: máquinas ferramentas, ferramentas e dispositivos. A força de usinagem pode ser decomposta em três diferentes direções ou componentes: força principal de corte ou simplesmente força de corte (F_s), força de avanço (F_v) e força passiva ou de recuo (F_r). A figura 12 (14) apresenta a direção das forças de corte, para o processo de torneamento.

Na figura 12, v , representa a velocidade de corte ou velocidade tangencial da peça, u , a velocidade de avanço da ferramenta e V_e , a velocidade resultante.

2.1.1.6. Formas de cavacos

Diversas classificações de cavaco têm sido propostas pelos pesquisadores. Uma das mais comuns, citada tanto na literatura alemã como americana, consiste em três tipos (4):

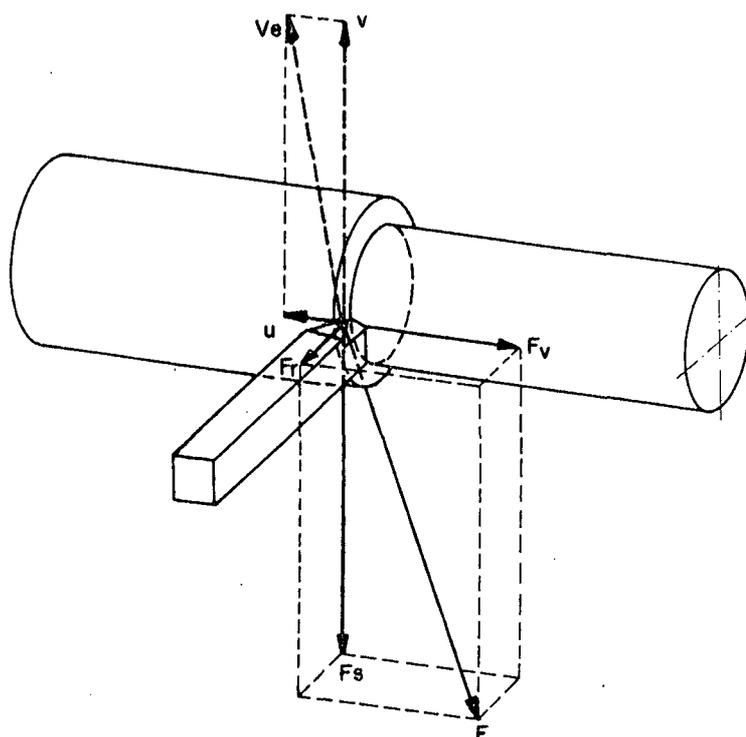


Fig. 12 - Direção das forças de corte e velocidades, no processo de torneamento.

o cavaco contínuo, o de cisalhamento e o de ruptura.

O primeiro tipo forma-se na usinagem de metais dúteis e homogêneos. O segundo tipo forma-se quando houver diminuição da resistência do material no plano de cisalhamento, devido o aumento da deformação, ou à heterogeneidade da estrutura do material. O terceiro tipo forma-se na usinagem de metais frágeis ou de estruturas heterogêneas, tais como o ferro fundido ou latão (4).

Além dos três tipos mencionados, pode-se diferenciá-lo quanto a sua forma em (24): cavaco em fita, helicoidal, espiral e em lascas ou pedaços. Certas formas dificultam a operação de usinagem, prejudicam o acabamento superficial da peça e influem no desgaste da ferramenta (4). Entre eles o mais indesejável é o cavaco em fita, que pode provocar acidentes, ocupa muito espaço e é de difícil transporte.

A forma do cavaco pode ser modificada pela modificação das condições de corte, dando-se uma forma especial ou colocando-se elementos adicionais na superfície de saída da ferramenta (5).

2.2. Usinabilidade dos ferros fundidos

2.2.1. Caracterização dos ferros fundidos

Ferro fundido é uma liga ferro-carbono-silício, de teores de carbono geralmente acima de 2%, em quantidade superior à que pode ser retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita (2). Em determinados tipos são adicionados elementos de liga, cuja função é conferir propriedades especiais.

O carbono é o elemento mais importante responsável pelas propriedades mecânicas e tecnológicas. Juntamente com o silício, determina a quantidade de grafita que é possível se formar (25).

A tabela I apresenta a faixa de composição química dos principais tipos de ferros fundidos.

Pelo aspecto da fratura, os ferros costumam ser classificados em três grupos (25): ferro cinzento, ferro branco e ferro mesclado.

O ferro cinzento se caracteriza por apresentar a fratura de cor escura, onde a maior parte do carbono se encontra no estado livre (grafita lamelar) e a parcela restante no estado combinado, formando a cimentita (Fe_3C) (2).

O ferro branco, cuja fratura mostra uma colora

Material	Faixa de Composição Química (% em peso)				
	%C	%Si	%Mn	%S	%P
FC (26)	2,50	1,00	0,25	0,02	0,05
	a 4,00	a 3,00	a 1,00	a 0,25	a 1,00
FE (27)	3,45	2,60	0,25	0,04	0,005
	a 3,80	a 2,90	a 0,50		a 0,010
FMP (28)	2,20	1,00	0,20	0,07	0,10
	a 2,80	a 1,60	a 0,50	a 0,15	
FMB (28)	2,80	0,40	0,20	0,10	0,10
	a 3,40	a 0,80	a 0,50	a 0,25	

Tab. I - Faixa de composição química usada nos principais tipos de ferros fundidos.

FC - ferro fundido cinzento
 FE - ferro fundido nodular
 FMP - ferro fundido maleável preto
 FMB - ferro fundido maleável branco

ção clara, também conhecido como ferro fundido duro, apresenta quase todo o carbono na forma combinada (Fe_3C) (2).

O ferro mesclado, que apresenta uma fratura com regiões claras e outras escuras, caracteriza-se por uma mescla de proporções variáveis de ferro fundido branco e cinzento (2).

No que diz respeito a forma da grafita, distinguem-se basicamente dois tipos de ferros: os que apresentam a grafita na forma lamelar e, os que apresentam a grafita na forma esferoidal.

O primeiro tipo normalmente aparece nos ferros cinzentos. Por outro lado, os que apresentam a grafita na forma esferoidal são os que sofrem um tratamento de transformação estrutural quando ainda no estado líquido (ferro fundido nodular) ou no estado sólido, através do tratamento de maleabilização (ferro fundido maleável) (2).

Os maleáveis são ligas que se solidificam como ferros fundidos brancos, sendo posteriormente submetidos ao tratamento térmico de maleabilização. Durante este tratamento, a cementita se decompõe em grafita e austenita, dando origem aos chamados ferros maleáveis de núcleo preto ou americano, ou é removida parcialmente por oxidação, dando origem ao ferro maleável branco ou europeu (29).

No estudo da usinabilidade dos ferros fundidos e dos metais em geral, dois aspectos merecem especial atenção: o primeiro, aquele que relaciona a composição química e, o segundo, o que relaciona a microestrutura com a usinabilidade.

2.2.2. Influência da composição química na usinabilidade dos ferros fundidos.

A determinação da influência dos elementos de liga que compõe os ferros fundidos é bastante difícil devido (29): a reação entre si destes elementos, seu efeito na microestrutura e a taxa de resfriamento.

A influência de elementos químicos na usinabilidade dos ferros fundidos pode ser resumida da seguinte forma:

a) Silício

O silício é um poderoso grafitizante, usado nos ferros fundidos como elemento controlador da formação da grafita. O ferro com baixo teor de silício apresenta uma fratura mesclada com pouco carbono livre e muito carbono combinado, apresentando por isto, baixa usinabilidade. A usinabilidade dos ferros fundidos é sensivelmente diminuída quando a percentagem de silício supera os 3% (30).

b) Enxofre e manganês

A influência do manganês e do enxofre, já foi objeto de uma série de pesquisas na usinabilidade dos aços(1)

e ferros fundidos cinzentos (31). Com base nos resultados apresentados, desenhou-se um campo para novas pesquisas, visando determinar o comportamento da usinabilidade de outros tipos de ferros fundidos.

A usinabilidade dos aços pode ser melhorada com a adição de maior percentagem de enxofre na sua composição química. A presença de maior quantidade deste elemento se traduz na formação de maior número de sulfetos, que são responsáveis pela ruptura do cavaco em pequenos fragmentos (1).

A figura 13 (1) apresenta os resultados experimentais dos ensaios de usinabilidade de curta duração levados até o colapso total da ferramenta (1). Ensaios realizados com aços Thomas (aços obtidos em conversosr Thomas) com diferentes composições de enxofre. Em alguns casos, a velocidade é aumentada em aproximadamente 40 m/min, devido a presença de maior percentagem de enxofre na composição do material.

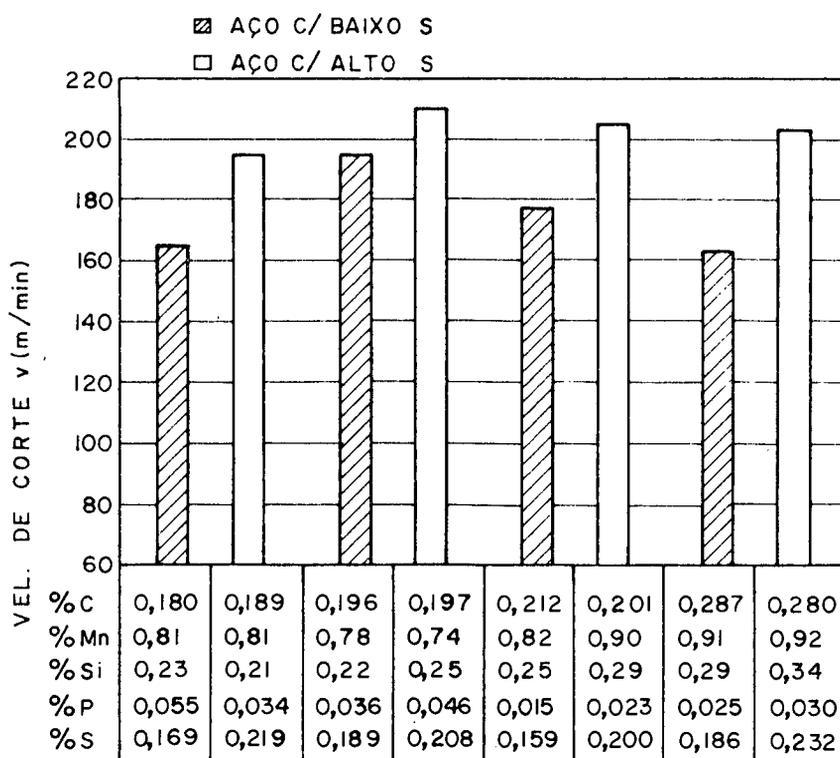


Fig. 13 - Influência da variação da percentagem de enxofre na usinabilidade dos aços Thomas. Ensaios de usinabilidade de curta duração.

Pesquisas americanas (1) revelaram, que para aços de usinagem fácil (aços usados em máquinas automáticas) obtidos em conversor Bessemer, a melhor quantidade de manganês está na faixa de 0,75 a 1%. Para os aços obtidos em conversor Siemens-Martin, entre 1 a 1,3%.

Em pesquisas alemãs (1), com aços Thomas de diferentes percentagens de carbono, não foi encontrado nenhum efeito benéfico na usinabilidade, devido ao aumento da quantidade de manganês. Por outro lado, devido a adição simultânea de maior quantidade de manganês e enxofre, há a formação de maior número de sulfetos que melhoram consideravelmente a usinabilidade, figura 14 (1). Resultados idênticos foram obtidos em pesquisas americanas (1). Sulfetos alongados apresentaram-se menos benéficos que os mais compactos (1) (menor relação comprimento largura).

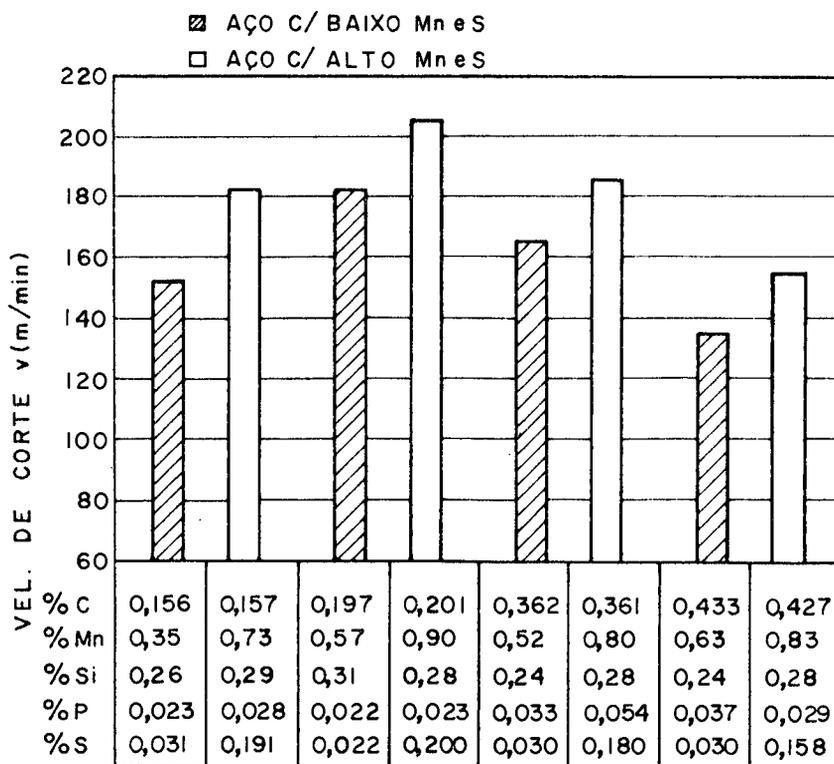


Fig. 14 - Influência da variação simultânea de enxofre e manganês na usinabilidade dos aços Thomas. Ensaios de usinabilidade de curta duração.

O carbono tem apresentado alguma influência na forma dos sulfetos, conforme pode ser observado na figura 15 (1). A forma dos sulfetos, no caso "b" da figura 15 (1), não parece tão vermicular como é no caso "a", conseqüentemente, a relação comprimento largura é menor.

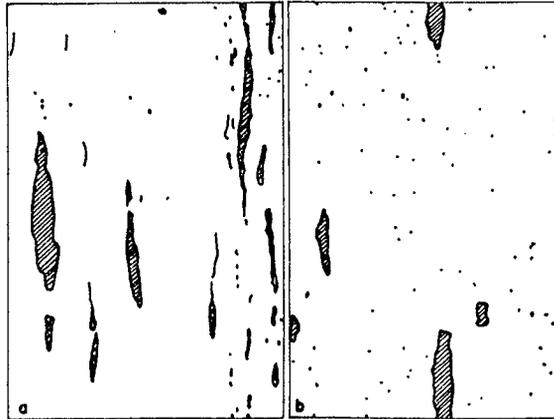


Fig. 15 - Influência da percentagem de carbono na forma dos sulfetos de manganês.

a - 0,14% C e 0,01% Si
b - 0,07% C e 0,01% Si

Dois pesquisadores americanos (31), desenvolveram um trabalho de pesquisa com o ferro fundido cinzento, tendo como objetivo, determinar a influência dos sulfetos de manganês na vida da ferramenta. Como critério de fim de vida foi usado o desgaste de flanco de 0,15 mm ($VB = 0,15$ mm). O estudo desenvolveu-se com três diferentes ligas, havendo entre elas, uma variação da percentagem de manganês e enxofre.

Os ensaios de dureza e resistência destas três ligas de ferro cinzento, mostraram que a variação da percentagem de manganês e enxofre não afetou consideravelmente estas duas propriedades.

Os ensaios de usinabilidade foram realizados usando-se três processos de usinagem: torneamento, fresamento e furação. Os resultados obtidos foram idênticos.

A tabela II (31) apresenta o resumo dos resultados do processo de torneamento.

FERRAMENTA: CLASSE WC					
s = 0,254 mm/rot			VB = 0,15 mm		
a = 2,54 mm			$vT^n = C$ (equação de Taylor)		
%S	C(v1) (m/min)	n	v5 (m/min)	v10 (m/min)	VIDA DA FERRAMENTA T(min), PARA v = 120 m/min.
0,02	173	0,362	97	75	2,74
0,12	171	0,337	134	106	6,98

Tab. II - Sumário da influência do enxofre na usinabilidade do ferro fundido cinzento.

Esta tabela leva a concluir que para uma velocidade de 120 m/min e, variando o teor de enxofre de 0,02% para 0,12%, há um aumento de aproximadamente 150% na vida da ferramenta.

A figura 16 (31) apresenta as curvas do efeito dos MnS sobre a vida da ferramenta.

Os autores supõem que o aumento na vida da ferramenta, seja uma consequência do efeito lubrificante adicional proporcionado pelos sulfetos de manganês (MnS), reduzindo o atrito e conseqüentemente a temperatura de corte. Um segundo efeito pode ser a formação de uma barreira anti-difusão entre o cobalto e o ferro na interface peça-ferramenta (31).

c) Fósforo

Experiências mostraram que geralmente percentagens de até 0,5% de fósforo não apresentam efeito nocivo significativa na usinabilidade dos ferros fundidos. Em alguns casos, a usinabilidade pode inclusive ser melhor, para percentagens de fósforo inferior a 0,35%. Mesmo com teores de até 1,4% de fósforo, os ferros fundidos podem ainda ser usinados, isto

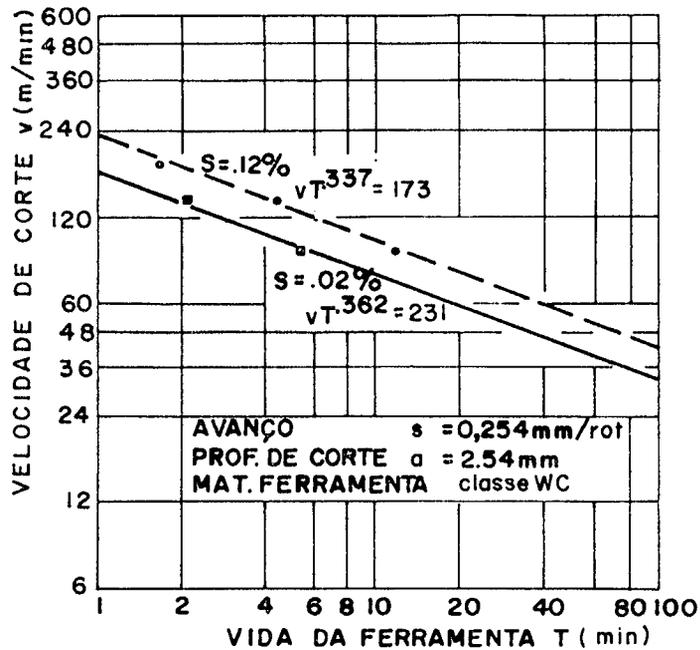


FIG. 16 - Influência da porcentagem de enxofre na vida da ferramenta de WC, para $s = 0,254$ mm/rot, $a = 2,54$ mm e $VB = 0,15$ mm.

quando isentos de carbonetos de ferro, cuja dureza é da ordem de 750 HV (32).

d) Estanho e cobre

O estanho e o cobre são estabilizadores da perlita. Foi verificado que o estanho pode prejudicar a usinabilidade. Experiências mostraram que o ferro fundido ligado com cobre e dureza de 200 HB, apresenta a mesma usinabilidade que o ferro fundido não ligado com dureza de 181 HB (30).

e) Cromo

O cromo está presente em pequenas quantidades e é função da quantidade de sucata usada. A usinabilidade é prejudicada pela presença deste poderoso estabilizador de carbonetos (30).

2.2.3. Influência da microestrutura na usinabilidade dos ferros fundidos.

A usinabilidade dos ferros fundidos varia com a proporção e distribuição de seus diversos constituintes. A tabela III (33) mostra que, a medida que a estrutura do material é constituída de uma matriz mais dura, a velocidade permitida para a mesma vida da ferramenta torna-se menor. Estruturas com 95% de perlita fina e 5% de cementita permitem usar velocidades de corte de apenas 1/4 daquelas usadas para ferros completamente ferríticos.

AUMENTO DA VIDA DA FERRAMENTA ←					
	Porcentagem Relativa				
% Ferrita	100	50	0	0	0
% Perlita Grosseira	0	50	100	-	-
% Perlita Fina	-	-	-	100	95
% Cementita	-	-	-	-	5
Dureza Brinell	120	150	195	218	240
Velocidade Recomendada, m/min	244	168	98	82	61
Torneamento com pastilha de metal duro, de classe indicada para ferro fundido.					

Tab. III - Influência da microestrutura dos ferros fundidos na vida da ferramenta e velocidade de corte.

A seguir, será apresentado um resumo do efeito de cada um dos microconstituintes na usinabilidade dos ferros fundidos.

a) Grafita

A grafita cria descontinuidades na matriz facilitando com isto a ruptura do cavaco. Além disso, atua como lubrificante e impede a soldagem do material à ferramenta, reduzindo a formação da aresta postiça de corte. A forma da grafita influi menos do que a proporção em que esta se encontra em determinado ferro fundido. O crescimento da proporção de grafita baixa as forças de corte, especialmente nos ferros fundidos com matriz ferrítica (34).

b) Ferrita

A dureza da ferrita nos ferros fundidos é da ordem de 100 a 150 HB e como a maior parte da ferrita dos ferros fundidos possui alto teor de silício, sua ductilidade diminui e conseqüentemente a usinabilidade é aumentada (34).

c) Perlita

Grande parte dos ferros fundidos usados na construção mecânica, possui a estrutura composta de ferrita e perlita, a fim de combinar uma boa resistência mecânica com uma boa usinabilidade. Para a perlita com dureza superior a 220 HB, a usinabilidade diminui com a elevação da proporção em que esta se encontra presente, em determinado ferro fundido. A perlita grossa usina mais facilmente que a fina (32).

d) Carbonetos

A presença de carbonetos com dureza de 800 HV e acima, mesmo em proporções muito pequenas, reduzem acentuadamente a usinabilidade e a durabilidade da ferramenta, principalmente para altas velocidades (34).

e) Austenita

A austenita só é encontrada em ferros fundidos com altos teores de Ni, Cu, Mn. Sua dureza é de 120 a 160 HB. A usinabilidade da austenita nos ferros fundidos é melhor que a dos aços austeníticos. Possui baixa condutibilidade térmica, que limita a velocidade de corte (32).

f) Outras estruturas

O tratamento térmico e a presença de elementos

de liga podem resultar em estruturas: sorbíticas, bainíticas, martensíticas e outras, de difícil usinagem, principalmente nos casos em que há a presença de carbonetos (32).

2.2.4. Usinabilidade dos ferros fundidos maleáveis.

Os ferros fundidos maleáveis oferecem melhor usinabilidade, além de uma série de características mecânicas análogas a certos tipos de aços com estruturas semelhantes (16).

A presença da grafita livre em consequência do recozimento, proporciona forças de corte até 40% inferiores comparado aos aços com propriedades semelhantes (17). A grafita atua como lubrificante na interface peça-ferramenta e contribui para a criação de descontinuidades da matriz, rompendo o cavaco em pequenos segmentos.

A figura 17 (35) mostra o comportamento da vida da ferramenta para diferentes velocidades e tipos de ferros maleáveis.

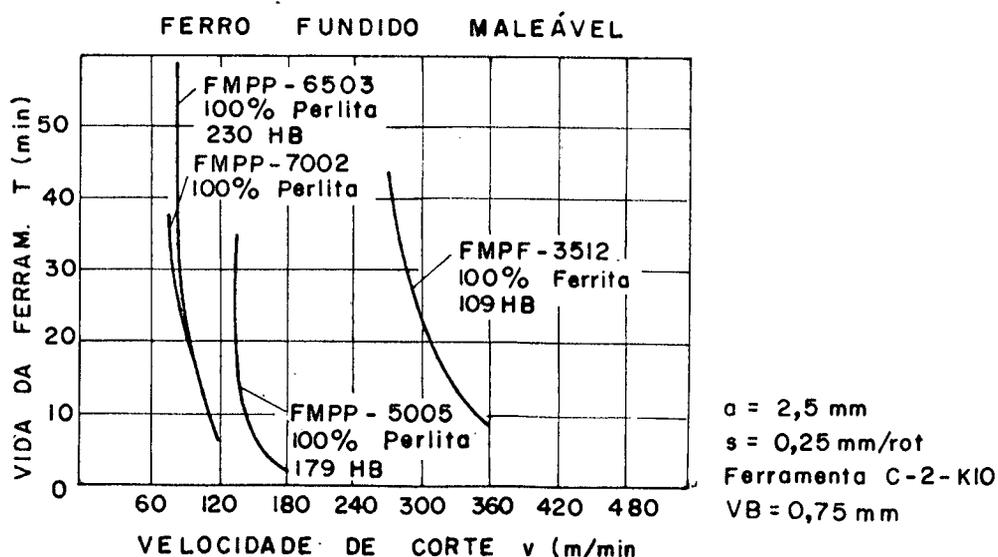


Fig. 17 - Vida da ferramenta em função da velocidade de corte, para o torneamento de diferentes tipos de ferros maleáveis; $s = 0,25 \text{ mm/rot}$, $a = 2,5 \text{ mm}$ e $VB = 0,75 \text{ mm}$.

Verifica-se que entre estes ferros, o que permite ser usinado com maior velocidade, é o maleável ferrítico.

Alguns estudos (6) já foram realizados com o FMPP - 4507, procurando determinar a influência da velocidade, avanço, profundidade de corte e ângulo da ferramenta, nas forças de corte.

Pesquisas realizadas (36) com o FMPF - 3512 permitem concluir que o uso de uma emulsão de óleo na proporção de 1:20 (uma parte de óleo e vinte de água) proporciona os seguintes benefícios:

- a) reduz o consumo de energia dentro de determinadas condições de corte;
- b) prolonga a vida da ferramenta;
- c) permite cortes mais profundos;
- d) melhora o acabamento superficial;
- e) permite usar velocidades de corte mais elevadas.

Estudos realizados (37) com o ferro fundido nodular, mostraram que um jato de óleo solúvel e água, dirigido sobre a superfície de incidência e saída, tem sido bastante eficiente na redução da aderência de flanco.

O uso de velocidades e ângulos de incidência adequados, ou o uso de ferramentas cerâmicas tem mostrado consideravelmente influência no sentido de reduzir a aderência de flanco (37).

3. EQUIPAMENTO USADO NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS, A FERIÇÕES.

A parte experimental deste trabalho, foi realizada nos laboratórios do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. Os corpos de prova, foram gratuitamente fabricados pelo Centro de Pesquisas da Fundação Tupy S.A., Joinville, SC, por intermédio do Convênio Tupy - UFSC. As ferramentas (insertos reversíveis) e respectivo porta-ferramentas, foram gentilmente doados pela Brassinter S.A., São Paulo.

3.1. A máquina ferramenta

Usou-se como máquina ferramenta para os ensaios de usinabilidade, um torno de fabricação nacional, especialmente adaptado para possibilitar uma variação contínua de velocidade, dentro de um intervalo. Um variador escalonado, de 12 escalões, permite ampliar este intervalo de 50 r.p.m., até 2000 r.p.m.

A figura 18 apresenta um desenho esquemático do torno P-400.

Máquina: torno Imor

Modelo: P-400

Fabricante: Indústrias Romi S.A.

Santa Bárbara D'Oeste - São Paulo

Distância entre pontas: 1000 mm

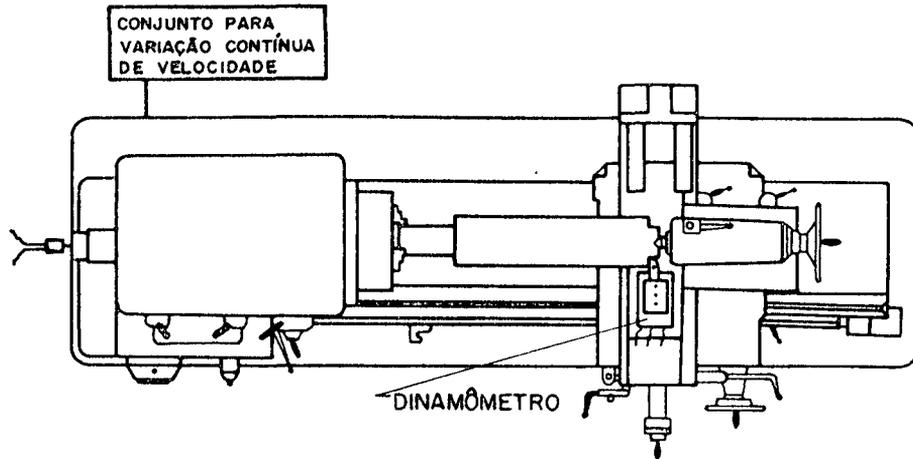


Fig. 18 - Desenho esquemático do torno Imor P-400

Diâmetro máximo
 permitido sobre o barramento: 430 mm
 Potência do motor: 10 kW

3.2. Ferramenta, porta-ferramenta e câmara de arrefecimento.

Para a usinagem de ferro fundido maleável e as condições de corte usadas, uma das ferramentas mais recomendadas é a classe ISO K20 (NHA). Apresentando em sua composição química cerca de 6% de cobalto, 2% de carbonetos de titânio e tântalo e 92% de carboneto de tungstênio (38).

As ferramentas foram usadas na forma de insertos reversíveis fixados em suporte (porta-ferramenta) apropriado para o tamanho e forma do inserto.

Ferramenta

Fabricante: Brassinter - São Paulo
 Referência: S.N.C.N. - 12.04.12 ISO K20 (NHA)
 Formato: quadrada, 12,70x12,70 mm
 Espessura: 4,76 mm
 Tipo: precisão
 Número de arestas cortantes: 8 (oito)

Porta-Ferramenta

Fabricante: Brassinter S.A. - São Paulo

Modelo: SBTR - 16 m

Dimensões: 25x25x150 mm

Ângulos: de saída - $\gamma = -6^\circ$

de incidência - $\alpha = 6^\circ$

de posição - $\chi = 75^\circ$

de ponta - $\epsilon = 90^\circ$

Para evitar o surgimento de tensões internas no transdutor, tensões estas que irão mascarar os resultados, tornou-se necessário o arrefecimento da ferramenta, de forma que o calor desta produzido pela usinagem não se transfira à plataforma dinamométrica. As tensões são resultantes de uma distribuição desuniforme de temperaturas na plataforma quando esta não é arrefecida. A figura 19 apresenta o desenho da câmara de arrefecimento que foi projetada.

3.3. Equipamento para a medição das componentes da força de usinagem.

As forças de corte (F_s), avanço (F_v) e passiva (F_r), foram medidas por um dinamômetro piezo-elétrico. O dinamômetro por sua vez, é composto dos seguintes aparelhos (figura 20).

- a) o transdutor: uma plataforma para a medição tridimensional da força de usinagem.

Fabricante: Kistler - Suíça

Modelo: plataforma para a medição das três componentes da força de usinagem

Referência: 9257-A

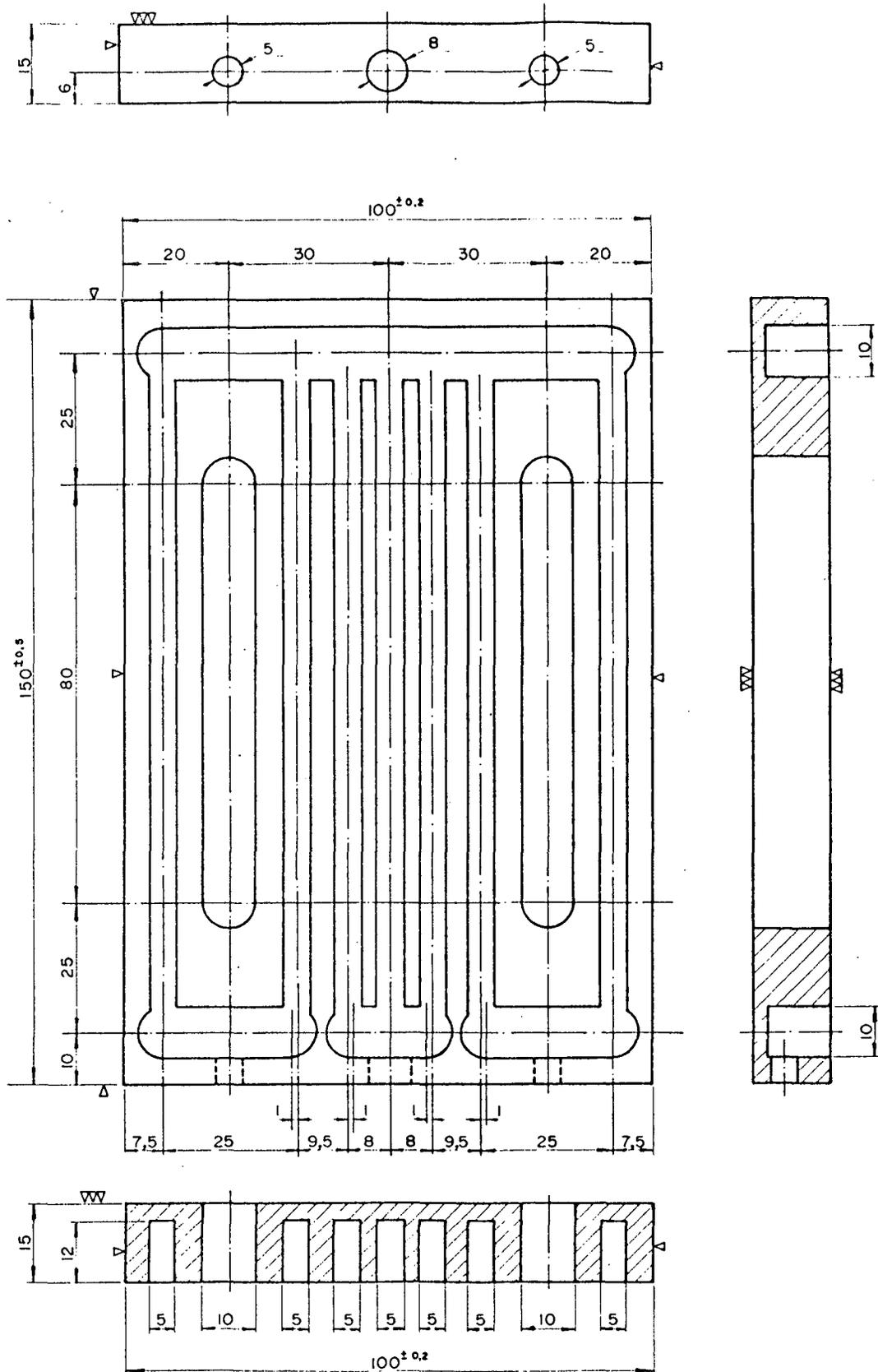


Fig. 19 - Câmara para arrefecimento da plataforma dinâmométrica de três componentes.

Força máxima: $F_x(F_v)$; $F_y(F_r) = 5000 \text{ N}$
 $F_z(F_s) = 10000 \text{ N}$

Resolução: $0,010 \text{ N}$

Capacidade de sobrecarga: 50%

Rigidez na direção $z = 2000 \text{ N}/\mu$

$x, y = 1000 \text{ N}/\mu$

Frequência de ressonância: $1,0 \times 10^3 \text{ Hz}$

Linearidade: 1,0%

- b) amplificador de carga: três módulos sendo um para cada componente da força de usinagem.

Fabricante: Kistler - Suíça

Referência: 5001

Campo de medição: 10 a $5,0 \times 10^5 \text{ pC}$ em 12 graus

Capacitor variável: 10 a $5,0 \times 10^5 \text{ pF}$

Tensão máxima de saída: 10 volts

- c) indicadores analógicos: um para cada componente da força de usinagem.

Fabricante: Kistler - Suíça

Referência: 5051

Campo de medição: 0 a 10 volts

Resolução: 0,1 volt

3.4. Medidor de rotação da máquina ferramenta

Para medir a rotação da árvore do torno, foi usado um taco gerador conectado à extremidade anterior desta.

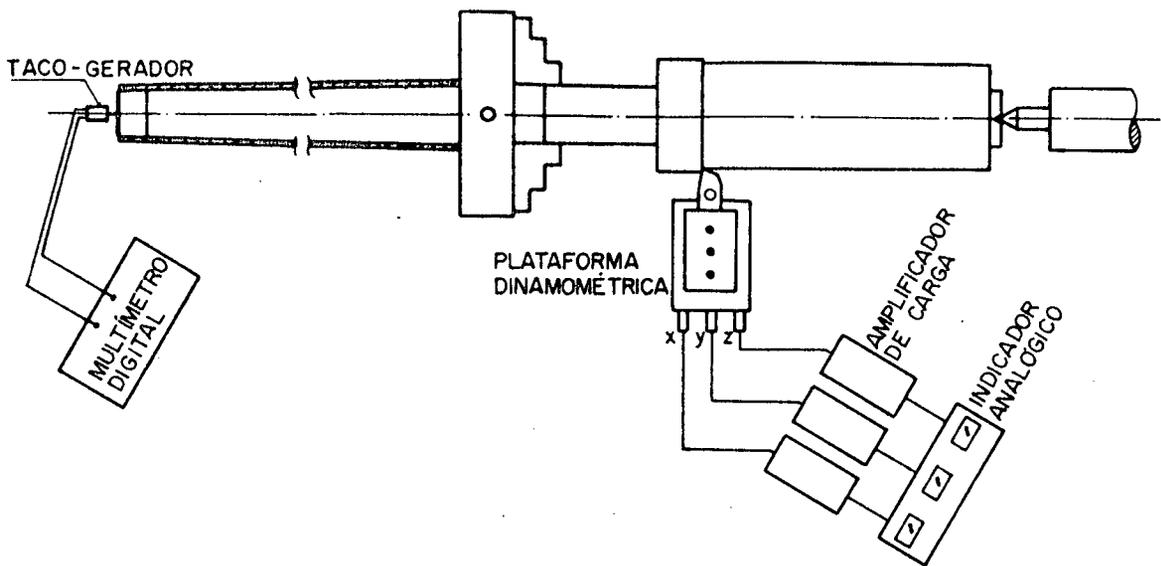


Fig. 20 - Equipamento para a medição da velocidade e forças de corte.

A tensão de saída do taco gerador, foi medida por um voltímetro digital. A figura 21 apresenta a máquina ferramenta e a instrumentação usada no ensaio de torneamento.

Taco gerador

Fabricante: Beckmann

Modelo: 9150

Constante de medição: 1000 r.p.m./7 volts

Voltímetro digital (multímetro)

Fabricante: Analog Instrumentos Analógicos Digitais Ltda - São Paulo.

Medição da tensão em C.C.

Faixa de medição: 0 - 20 volts

3.5. Sistema para a medição dos desgastes da ferramenta.

Neste trabalho, o critério de fim de vida da ferramenta foi o do desgaste de flanco (VB). Entretanto, sempre que possível, também foi efetuada a medição das dimensões da cratera. Para a medição do desgaste de flanco e largura da cratera (KM), foi usado um microscópio de ferramentaria, figura 22.



Fig. 22 - Microscópio de ferramentaria usado para a medição do desgaste de flanco e largura da cratera.

Fabricante: Nikon - Japão

Modelo: Mesuriscopes

Mesa micrométrica com campo de medição de 50x
100 mm

Resolução de mesa micrométrica: 0,001 mm

Para a medição da profundidade da cratera KT foi usado um microscópio para análises metalográficas, ao qual foi adaptado um relógio comparador, figura 23.

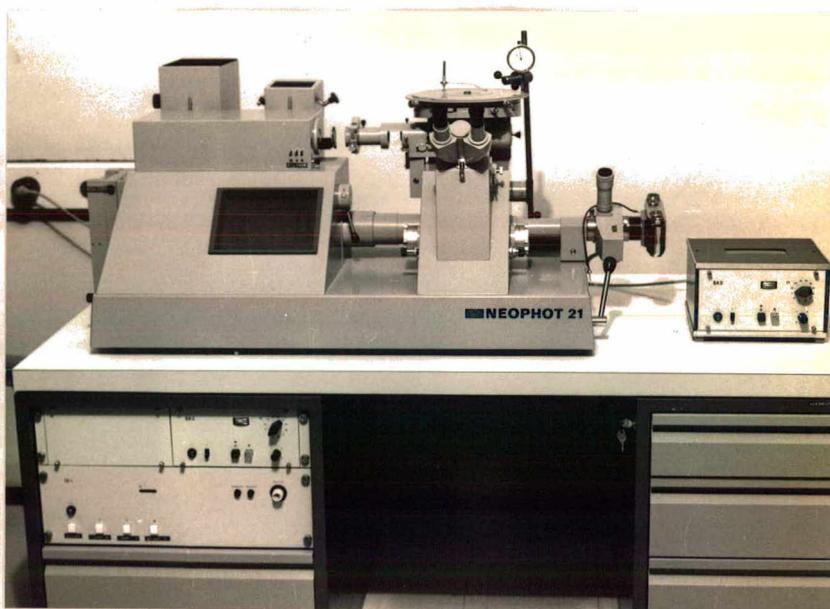


Fig. 23 - Microscópio e relógio comparador usado na medição da profundidade da cratera.

Microscópio: Neophot - 21

Fabricante: Carl Zeiss - Jena

Magnificação: 50x

Relógio comparador

Fabricante: C.S.E.

Resolução: 0,001 mm

3.6. Metalografia convencional e quantitativa, equipamento usado.

A quantidade e geometria dos sulfetos de manganês foi determinada por um processador semi-automático de imagens, MOP. Um projetor de diapositivo, projetou as imagens referentes às amostras sob a mesa com retículos magnéticos do MOP, figura 24.

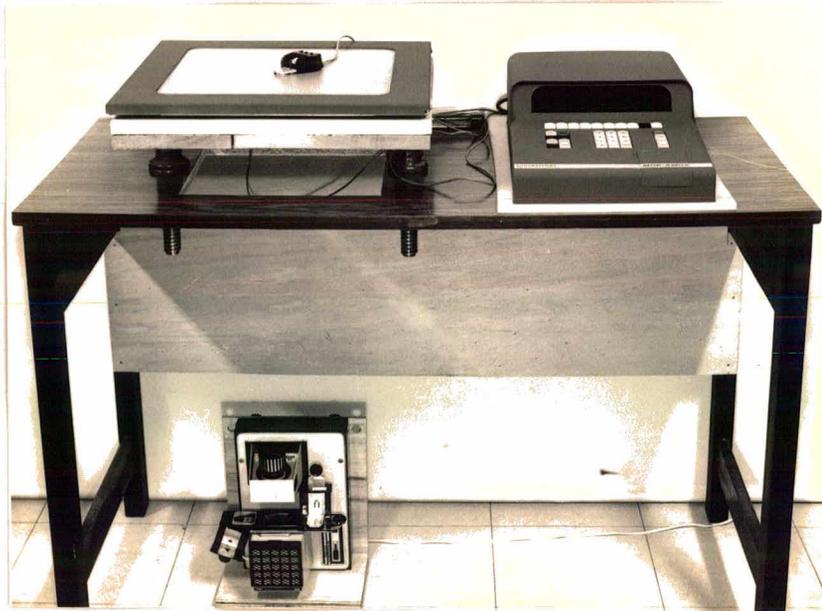


Fig. 24 - MOP-AM02 e projetor usado na análise metalográfica quantitativa.

MOP-AM02

Fabricante: Kontron Messgeräte

Projetor

Fabricante: Projefix

Modêlo: L-300

Para a análise metalográfica do material, usou-se o Neophot 21, já mencionado (figura 23).

3.7. Máquinas usadas nos ensaios mecânicos

Para os ensaios de resistência à tração, foi usada uma máquina Universal de Ensaios.

Fabricante: VEB

Modelo: ZDM 10/91

Capacidade: 100 kN

Acionamento: hidráulico

Acessórios: standard

Na determinação da dureza do material foi usada uma máquina Universal de Ensaios. À esta máquina, foi adaptada uma esfera de aço, temperada, com a finalidade de efetuar uma impressão no material do qual se deseja conhecer a dureza. O diâmetro da impressão foi medido com o auxílio de uma lupa e posteriormente convertido em dureza Brinell.

Máquina Universal de Ensaios

Fabricante: VEB

Modelo: ZDM-U

Capacidade: $3,0 \times 10^5$ N

Acionamento: hidráulico

Impressão no material

Esfera de aço temperada: $\varnothing = 5$ mm

Carga aplicada: 7500 N

Leitura do diâmetro da impressão

Lupa

Fabricante: Carl Zeiss - Jena - Alemanha Oriental

3.8. Aferições

As aferições do avanço, profundidade de corte, dinamômetro e taco gerador, foram realizadas juntamente com Weingaetner (39), que apresenta em seu trabalho alguns detalhes sobre o procedimento adotado.

Como o avanço se constitui em um parâmetro importante, tanto na usinabilidade como na magnitude das forças de corte, foi utilizado o fuso, em vez da vara para o acionamento do carro longitudinal. Os resultados das aferições do avanço e profundidade de corte, apresentaram erros desprezíveis em relação aos valores selecionados.

Os equipamentos Kistler, permitem que sua saída em tensão elétrica seja regulada de modo que as unidades mecânicas possam ser colocadas na relação 1:1, como, por exemplo 1 N equivale a 1 volt. Para isto, é necessário ajustar o capacitor variável (trans, sens, range) do amplificador de carga. A aferição mostrou uma ótima correspondência linear, entre a carga aplicada e o valor obtido pelo indicador analógico. O erro é inferior a 2% em todo o campo de trabalho. Resultados semelhantes foram encontrados na aferição do taco gerador.

4. MATERIAL USADO E SUA CARACTERIZAÇÃO

Tendo por finalidade a detecção de possíveis e feitos colaterais na usinabilidade do material, que podem ofuscar o efeito dos sulfetos de manganês, foi realizado um estudo onde se procurou verificar: a variação da composição química, o tipo de microestrutura e a presença de possíveis defeitos de fundição, as propriedades mecânicas e físicas e finalmente, com o auxílio da metalografia quantitativa, algumas grandezas referentes ao número e forma das inclusões de sulfetos de manganês.

4.1. Forma dos corpos de prova, sua composição química e microestrutura.

a) Forma dos corpos de prova

A parte experimental deste trabalho, foi realizada com o ferro fundido maleável preto ferrítico, conhecido na ABNT pela notação FMPF-3512 (DIN-CTS-35; ASTM-32510).

Após o processo de fundição e tratamento térmico de maleabilização, os corpos de prova para os ensaios de usinabilidade, apresentaram aproximadamente as seguintes dimensões: comprimento 200 mm, diâmetro externo 170 mm e diâmetro interno 120 mm. Cada corpo de prova pesou 16 kg. A figura 25 apresenta a forma e dimensões dos corpos de prova usados nos ensaios de usinabilidade.

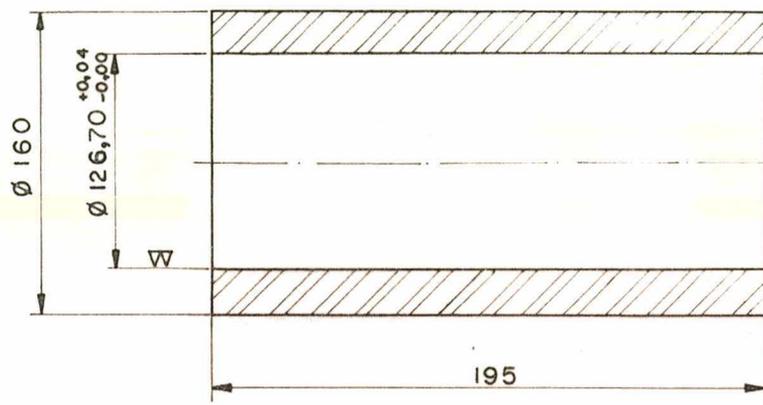


Fig. 25 - Forma e dimensões dos corpos de prova usados nos ensaios de usinabilidade.

b) Composição química

A análise química do material, foi fornecida pelo fabricante (Centro de Pesquisas da Fundição Tupy SA), cujos resultados foram transcritos para a tabela IV.

MATERIAL		COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% EM PESO)					
GRUPO	CORPO DE PROVA SÉRIE	%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Mn/%S
G1	700	2,52	1,57	0,57	0,20	0,052	2,85
	800	2,47	1,61	0,60	0,21	0,053	2,86
	1000	2,56	1,58	0,58	0,25	0,046	2,32
MÉDIA		2,52	1,59	0,58	0,22	0,050	2,68
G2	1100	2,58	1,51	0,36	0,091	0,045	3,96
	1200	2,57	1,60	0,38	0,087	0,045	4,37
	1300	2,51	1,58	0,40	0,100	0,046	4,00
MÉDIA		2,55	1,56	0,38	0,093	0,045	4,19
G3	1500	2,51	1,60	0,30	0,030	-	10,00
	1800	2,54	1,60	0,28	0,026	-	10,77
	1900	2,48	1,55	0,29	0,027	-	10,36
MÉDIA		2,51	1,58	0,29	0,028	-	10,38

Tab. IV - Composição química do FMPF-3512, usado nos ensaios de usinabilidade.

Cada grupo de material foi fundido separadamente, formando uma série de corpos de prova. Apesar deste fato, pode ser observado na tabela IV que os elementos carbono e silício não apresentaram variações consideráveis. Pelo exposto e, com a finalidade de facilitar a compreensão, doravante far-se-á uso da tabela V, que representa os valores médios da tabela IV.

MATERIAL	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% EM PESO)					
GRUPO	%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Mn/%S
G1	2,52	1,59	0,58	0,22	0,050	2,68
G2	2,55	1,56	0,38	0,093	0,045	4,19
G3	2,51	1,58	0,29	0,028	-	10,38

Tab. V - Composição química médio dos corpos de prova de FMPF-3512, usados nos ensaios de usinabilidade.

c) Microestrutura

O FMPF-3512, usado na pesquisa, apresentou uma matriz 100% ferrítica, grafita esferoidal "rosetada", típica para este material que sofre o tratamento térmico de maleabilização por grafitização. Além da ferrita e da grafita, o material apresenta inclusões de sulfetos de manganês, cuja percentagem está relacionada com a quantidade de manganês e enxofre usado na composição química do material. Pelas amostras analisadas, não se constatou a presença de um número considerável de microporos. A figura 26 apresenta a microestrutura do material descrito.

As figuras 27, 28 e 29, mostram distintamente o efeito que existe na microestrutura, causado pela variação da percentagem de manganês e enxofre.

Observa-se nitidamente na figura 27, que repre

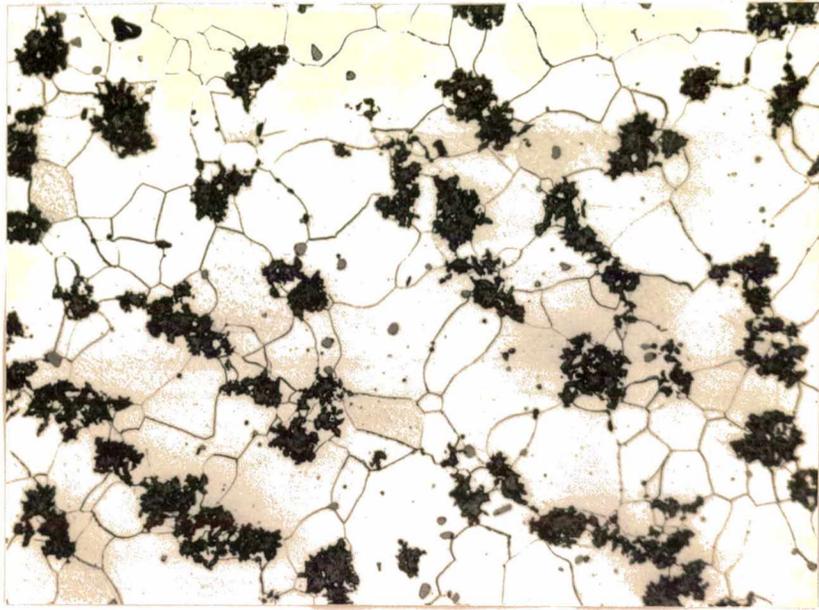


Fig. 26 - Microestrutura do FMPF-3512, usado nos ensaios de usinabilidade (aumento 110x, ataque nital 5%).

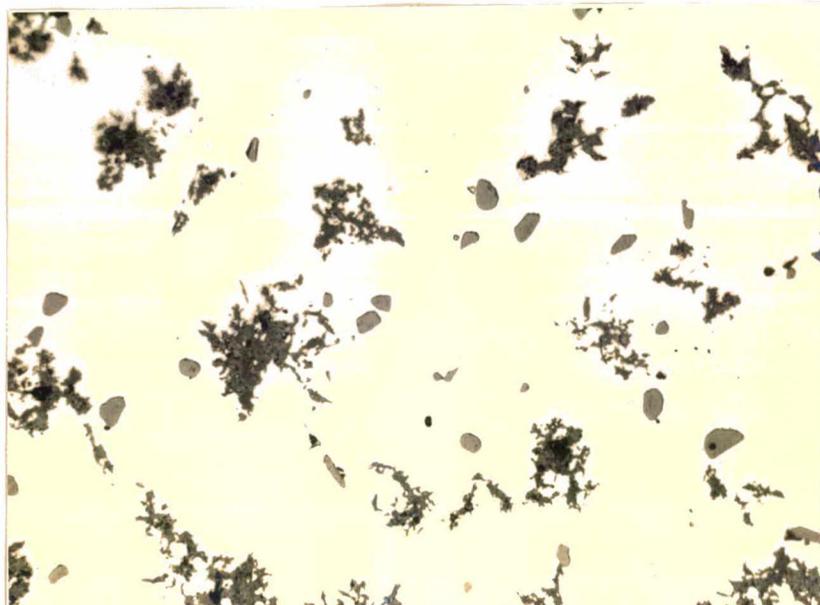


Fig. 27 - FMPF-3512, material do grupo C1 (aumento 250x, ataque com picral 4%).

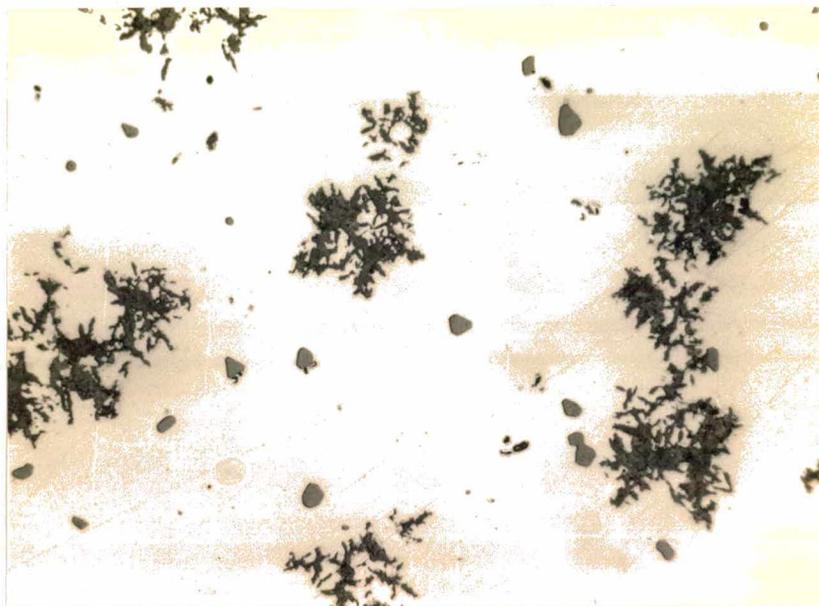


Fig. 28 - FMPF-3512, material do grupo C2 (aumento 250x, ataque com picral 4%).

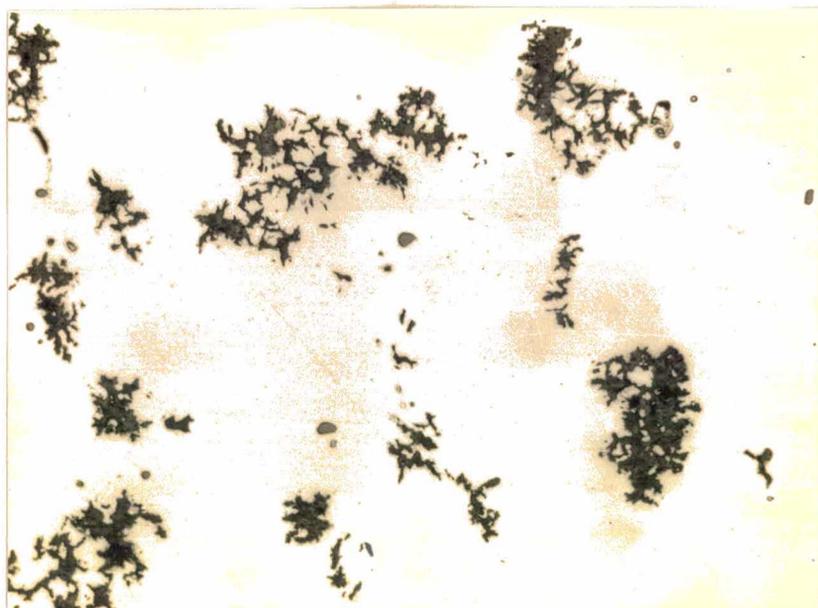


Fig. 29 - FMPF-3512, material do grupo C3 (aumento 250x, ataque com picral 4%).

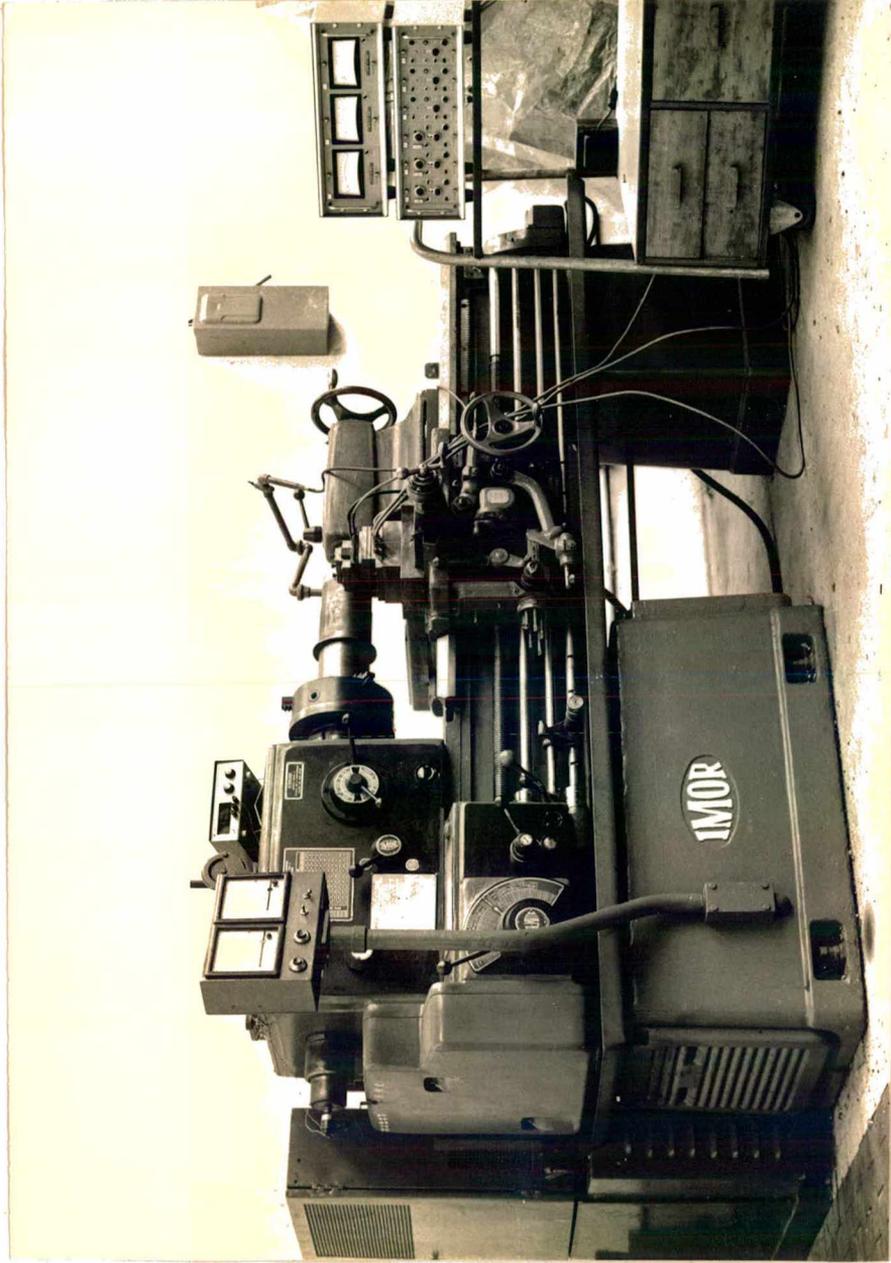


Fig. 21 - A máquina ferramenta e os equipamentos usados na máquina, para a realização dos ensaios de usinabilidade.

senta o material do grupo G1 com elevada percentagem de mangã nês e enxofre, possuindo em consequência, grande número de in clusões de MnS. Este número decresce à medida que é reduzida a quantidade de enxofre e manganês, tornando-se mínimo para o material G3 (figura 29).

4.2. Propriedades mecânicas e físicas

a) Dureza

Para os ensaios de dureza, foram usados dois tipos de corpos de prova. O primeiro, figura 30, foi obtido de uma seção transversal, central, dos corpos de prova usados para os ensaios de usinagem. Neste caso, tomou-se aleatoria mente uma amostra de cada série (veja tabela IV), para verifi car a variação da dureza ao longo da espessura de parede do cilindro (detalhe 1).

A tabela VI apresenta os resultados experimen tais dos ensaios de dureza realizados.

Os resultados permitem concluir que: em nenhu ma série de corpos de prova, houve uma variação considerável de dureza ao longo da espessura de parede do cilindro. Em se gundo lugar, conclue-se que a dureza dos três grupos de mate riais é praticamente a mesma.

A segunda forma de obtenção e pontos de medi ção da dureza são apresentados na figura 31, detalhe 2. Neste caso, tinha-se por objetivo, verificar a variação da dureza ao longo do comprimento do cilindro.

A tabela VII apresenta os resultados experimen tais dos ensaios de dureza realizados ao longo do comprimento do cilindro.

Conclue-se que: os corpos de prova 800 e 1900, não apresentaram variação na dureza longitudinal ou transver sal do cilindro. A variação apresentada pelo corpo de prova

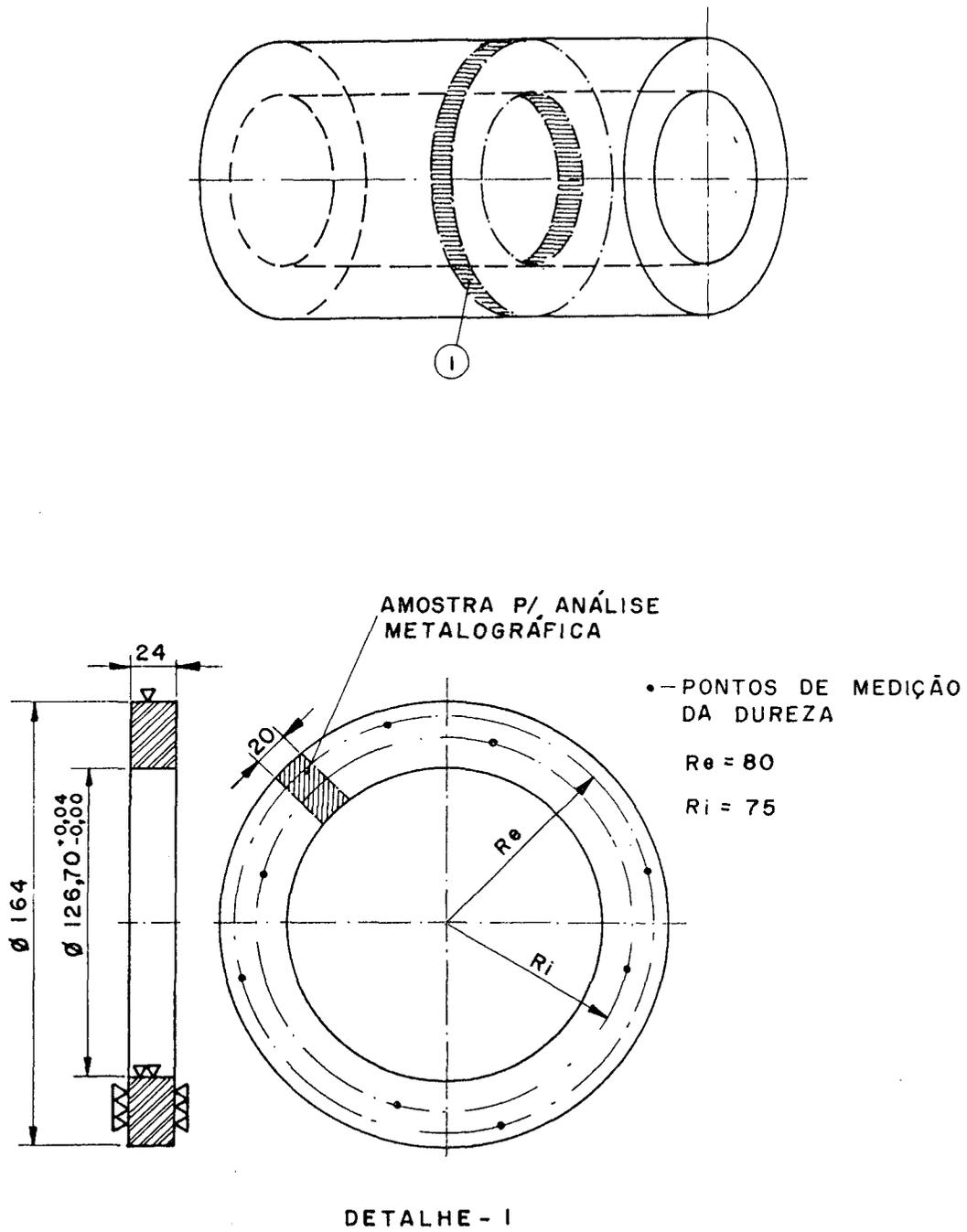
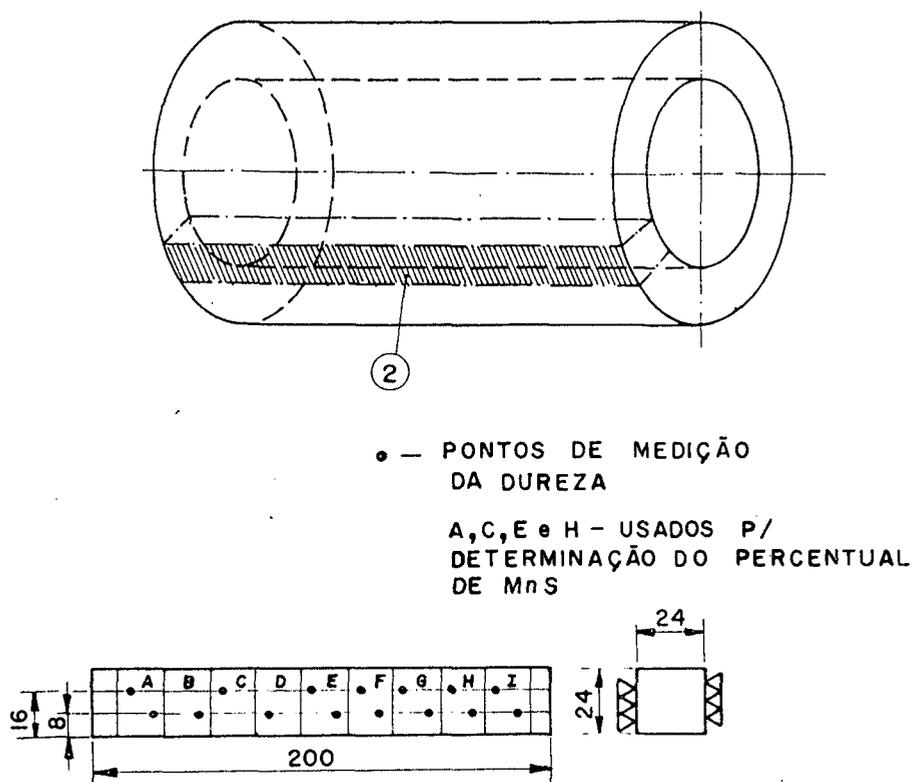


Fig. 30 - Corpo de prova para a determinação da dureza ao longo da espessura de parede do cilindro, usado nos ensaios de usinabilidade.

MATERIAL GRUPO SERIE		POSICÃO DE MEDICÃO	DUREZA HB - 5/7500 N				MEDIA	DESVIO PADRÃO	RESULTADO PARCIAL Média e Desv.Pad.	RESULTADO FINAL Média e Desv.Pad.
G1	700	Re	111	116	111	113	112,7	2,4	Re=114,3 (3,4) Ri=113,1 (3,4)	113,7 (3,3) {±1,3}
		Ri	111	111	111	111	111,0	0,0		
	800	Re	115	119	121	117	118,0	2,2		
		Ri	113	119	121	113	116,5	4,1		
	1000	Re	112	111	113	112	112,0	0,7		
		Ri	113	111	112	111	111,7	1,0		
G2	1100	Re	111	113	111	111	111,5	1,0	Re=111,8 (1,3) Ri=111,9 (1,5)	111,8 (1,3) {±0,5}
		Ri	111	112	111	111	111,3	0,5		
	1200	Re	115	111	111	111	112,0	2,0		
		Ri	113	111	113	113	112,0	1,2		
	1300	Re	113	111	112	111	111,7	1,0		
		Pi	112	116	111	111	112,5	2,4		
G3	1500	Re	111	111	111	111	111,0	0,0	Re=111,5 (0,9) Pi=111,4 (0,8)	111,5 (0,8) {±0,3}
		Ri	111	111	111	111	111,0	0,0		
	1800	Re	113	111	113	111	112,0	1,2		
		Ri	113	111	111	111	111,5	1,0		
	1900	Re	111	113	111	111	111,5	1,0		
		Ri	112	111	113	111	111,7	1,0		

OBS.: Os valores entre colchetes, representam a variação da média para um intervalo de confiança de 95%.

Tab. VI - Resultados experimentais dos ensaios de dureza. Diâmetro da esfera para ensaios 5 mm e carga de 7500 N.



DETALHE - 2

Fig. 31 - Corpo de prova para a determinação da dureza ao longo do comprimento do cilindro, usado nos ensaios de usinabilidade.

MATERIAL		POSICÃO DE MEDIÇÃO	D U R E Z A									RESULTADOS PARCIAIS		RESULTADOS FINAIS	
GRUPO	Nº C.P.		HB - 5/7500 N									MEDIA	DESVIO PADRÃO	MEDIA	DESVIO PADRÃO
G1	800	8 (mm)	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111,0	0,0	111,0 (±0,0)	0,0
		16 (mm)	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111,0	0,0		
G2	1107	8 (mm)	111	113	113	113	113	113	112	112	112,6	0,7	112,4 (±0,4)	0,7	
		16 (mm)	112	113	112	112	113	113	112	113	111	112,3			0,7
G3	1900	8 (mm)	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111,0	0,0	111,0 (±0,0)	0,0
		16 (mm)	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111,0	0,0		

OBS.: Os valores entre colchetes representam a variação da média para um intervalo de confiança de 95%.

Tab. VII - Resultados experimentais dos ensaios de dureza realizados ao longo do comprimento do corpo de prova. Diâmetro da esfera para ensaios 5 mm e carga de 7500 N.

1107 é desconsiderável e, comparada com a dureza dos dois primeiros, não atinge a 1%. Desta forma, fica caracterizada a homogeneidade do material e, a ausência da influência do manganês e enxofre na propriedade em estudo.

b) Resistência à tração, dureza e alongamento

Para os ensaios de resistência à tração, foram extraídos barras do mesmo cilindro e, com as mesmas dimensões dos corpos de prova usados nos ensaios de dureza longitudinal (figura 31, detalhe 2). Posteriormente estas barras foram usadas segundo as dimensões recomendadas pela ABNT-PEB-128, figura 32. Entretanto, esta mesma norma recomenda fundir os corpos de prova em moldes especiais, já nas dimensões finais para ensaios. Por esta razão, os valores de resistência obtidos neste trabalho podem divergir um pouco dos normalmente encontrados nas normas.

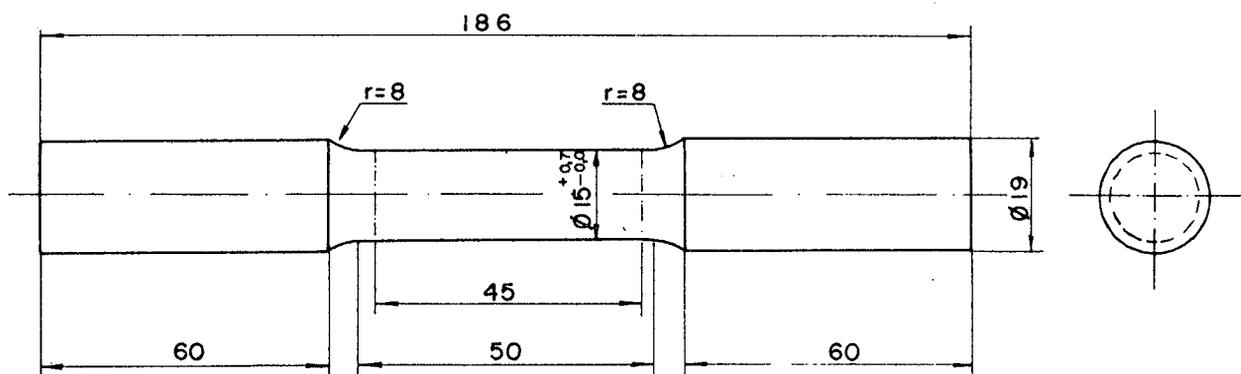


Fig. 32 - Forma e dimensões dos corpos de prova usados nos ensaios de tração.

A tabela VIII apresenta os resultados experimentais dos ensaios de resistência à tração, dureza e alongamento, conforme recomenda a ABNT-PEB-128.

Com base nos resultados apresentados na tabela VIII, conclue-se que a variação de manganês e enxofre na composição do material, não produziram variação considerável na

MATERIAL		DIÂMETRO DO C.P. (mm)	SEÇÃO So (mm ²)	CARGA DE RUPTURA P (N)	TENSÃO DE RUPTURA σ_r (N/mm ²)	DUREZA 2,5/187,5 HB	ALONGAMENTO %
GRUPO	SERIE DO C.P.						
G1	800 A	15,1	179,1	6.400	350,4	122	13,8
	800 B	15,3	183,8	6.500	353,5		13,6
	800 C	15,2	181,5	6.500	358,2		17,3
G2	1107 A	15,1	179,1	6.400	357,4	123	15,6
	1107 B	15,0	176,7	6.400	362,2		14,9
	1107 C	15,2	181,5	6.450	355,5		14,2
G3	1900 A	15,3	183,8	6.500	353,5	123	15,3
	1900 B	15,3	183,8	6.500	353,5		16,4
	1900 C	15,1	179,1	6.400	357,4		16,4

Tab. VIII - Resultados experimentais dos ensaios de resistência à tração, dureza e alongamento.

resistência à tração. Para que se tenha uma visão geral das propriedades acima apresentadas, a tabela XIX apresenta os valores médios e os desvios padrões.

MATERIAL	TENSÃO DE RUPTURA σ_r (n/mm ²)	DESVIO PADRÃO	DUREZA 2,5/187,5 HB	DESVIO PADRÃO	ALONGAMENTO %	DESVIO PADRÃO
GRUPO						
G1	354,0	3,9	122	2,0	14,9	2,1
G2	358,3	3,5	123	2,1	14,9	0,7
G3	354,8	2,3	123	2,0	16,1	0,6

Tab. XIX - Sumário dos resultados de resistência à tração, dureza e alongamento.

c) Condutibilidade térmica

É sabido que a condutibilidade térmica é outro fator que pode influir na usinabilidade de um material. Por esta razão a referida propriedade foi determinada para os três grupos de materiais em estudo. A condutibilidade térmica já foi amplamente discutida em recente publicação (40). Devido a isto serão apenas apresentados neste trabalho, os resultados obtidos nas medições. Estes resultados estão apresentados na tabela XX e na figura 33.

MATERIAL GRUPO	CORPO DE PROVA NÚMERO	CONDUTIBILIDADE TÉRMICA ($W K^{-1} m^{-1}$)						MÉDIA (DESV.PAD.)
		λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	
G1	800 A	34,33	34,69	34,33	34,69	35,05	34,68	{±0,2} 34,5 (0,3)
	800 B	34,07	34,07	34,43	34,43	34,43	34,43	
G2	1107 A	37,50	37,89	37,93	38,38	37,93	37,93	{±0,5} 37,4 (0,8)
	1107 B	36,33	36,33	36,74	36,74	37,15	37,15	
G3	1900 A	36,29	36,69	36,69	37,52	36,69	36,69	{±0,3} 36,8 (0,4)
	1900 B	36,29	36,65	36,69	37,49	37,11	37,11	

OBS.: Os valores entre colchetes representam a variação da média para um intervalo de confiança de 95%.

Tab. XX - Resultados experimentais da condutibilidade térmica dos três grupos de materiais.

É sabido da literatura (1) que o silício e o manganês reduzem consideravelmente a condutibilidade térmica do material, principalmente o primeiro.

Os resultados experimentais encontrados neste trabalho, mostram-se compatíveis com os apresentados na literatura (1). O material G1 (corpo de prova 800), apresenta 1,61% de silício e 0,60% de manganês, conseqüentemente é o material entre os três grupos o que apresenta menor condutibilidade. O material do grupo G2 (corpo de prova 1107), com 1,51% de silí

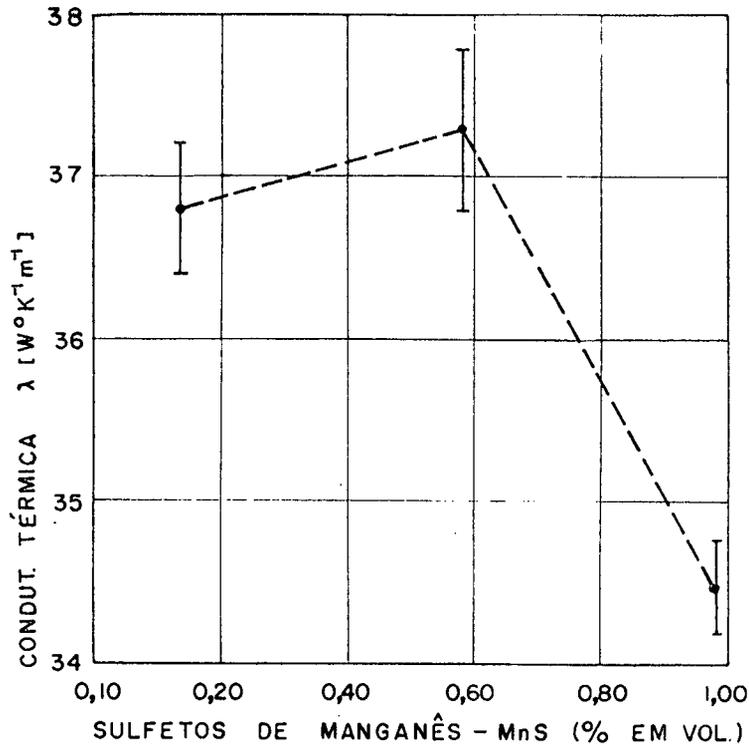


Fig. 33 - Resultados experimentais da condutibilidade térmica dos três grupos de materiais, em função da porcentagem volumétrica de MnS.

cio e 0,36% de manganês apresenta condutibilidade levemente superior ao do material do grupo G3, com 1,55% de silício e 0,29% de manganês. Isto pode indicar que a influência do silício realmente é superior a do manganês. O material G1 apresenta condutibilidade aproximadamente 7% inferior ao do material G3.

4.3. Metalografia quantitativa

4.3.1. Fundamentação teórica da metalografia quantitativa.

A precisão dos trabalhos de metalografia quantitativa semi-automática e automática, depende fundamentalmente da nitidez de contraste da figura em análise (41). No caso da semi-automática, o operador do cursor desempenha um papel importante no que tange a confiabilidade dos resultados.

Os corpos de prova sofrem o mesmo processo de preparação dos da metalografia convencional, procurando-se obter os contornos das imagens dos constituintes microestruturais bem definidos. Alguns reagentes mostram-se bastante indicados para este particular, como é o caso do picral, para os sulfetos de manganês.

As grandezas como: perímetro, diâmetro máximo, fator de forma e a superfície da inclusão, são determinados pela integração de ponto a ponto da figura em análise, pelo processador. Estas grandezas são registradas em milímetros. Para isto, torna-se necessário que a unidade processadora seja programada para obter as grandezas desejadas e, que o cursor seja movimentado sobre o contorno da imagem. A superfície específica pode ser calculada a partir de determinadas grandezas obtidas experimentalmente. O percentual de sulfetos é calculado em função da área de sulfetos na amostra e o tamanho total da amostra.

a) Perímetro (L)

O comprimento do perímetro de qualquer figura, pode ser obtido pelo movimento de translação do cursor sobre o contorno da figura. Quando se trata da medição de imagens com contornos muito irregulares, o operador deve ser metuculooso e medir todas as saliências e reentrâncias da figura, para que bons resultados sejam obtidos. Na medição de figuras fechadas, a pessoa responsável pela movimentação do cursor deve tomar as devidas precauções para que o ponto de partida do cursor coincida exatamente com o ponto de chegada. A figura 34 ilustra este procedimento.

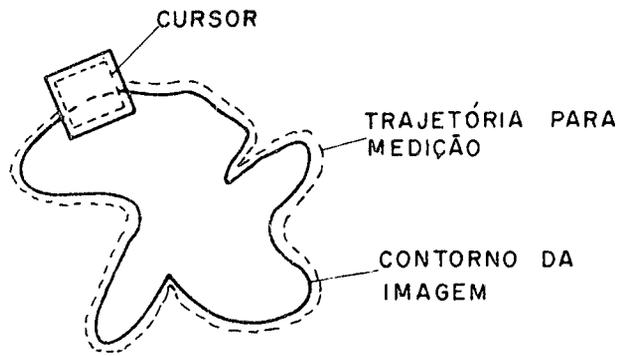


Fig. 34 - Procedimento para medir contornos de imagens.

Quando se deseja medir a distância entre dois pontos, que estão afastados entre si segundo uma trajetória retilínea, basta posicionar o cursor no ponto inicial e final.

b) Diâmetro máximo das partículas ($D_{\text{máx}}$)

Aqui também são válidas as recomendações do item "a". O diâmetro máximo de uma partícula independe da orientação da partícula na microestrutura (41). A figura 35 mostra o diâmetro máximo de duas diferentes formas de partículas.

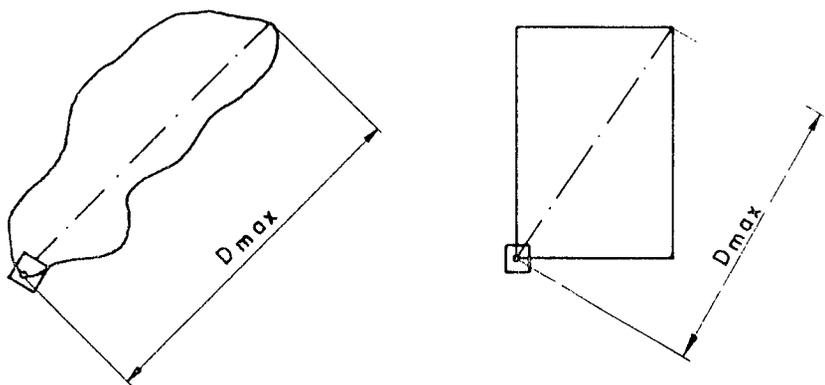


Fig. 35 - Diâmetro máximo da partícula

c) Fator de forma (F)

O fator de forma bi-dimensional (segundo o professor Fischmeister) (41), é obtido diretamente pela programação da unidade processadora do MOP. É uma relação entre a área (A) das partículas e o quadrado do somatório do perímetro das referidas partículas (U^2), conforme expressão que segue:

$$F = \frac{4\pi A}{U^2} \quad (1)$$

É facilmente demonstrável que para um disco o fator de forma vale 1 (um), basta lembrar que neste caso $A = \pi r^2$ e $U^2 = (2\pi r)^2$; onde r representa o raio da partícula. A medida que a partícula se afasta da forma circular (disco), o fator de forma diminui, aproximando-se cada vez mais de $F = 0$.

d) Área da partícula (A)

Para a medição da área da partícula, são igualmente válidas as recomendações do item "a", ocorrendo a integração do espaço compreendido entre a trajetória percorrida pelo cursor, conforme ilustra a figura 36.

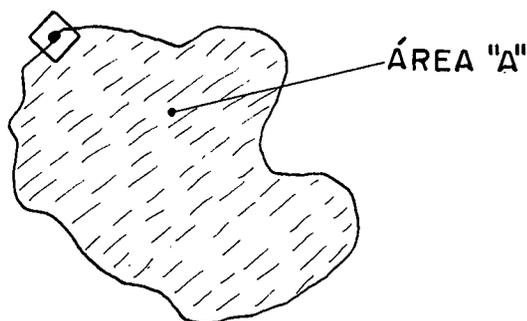


Fig. 36 - Medição da área de uma partícula.

e) Superfície específica (S_i)

Por definição, a superfície específica é a relação entre a superfície do componente i (s_i) na amostra e o volume (V_i) deste mesmo componente, conforme as expressões abaixo:

$$S_i = \frac{s_i}{V_i} \text{ (mm}^{-1}\text{)} \quad (2)$$

$$S_i = \frac{4 U_i \cdot M}{\pi A_i} \text{ (mm}^{-1}\text{)} \quad (3)$$

Na expressão acima U_i representa o somatório do perímetro das partículas, A_i a área e M a magnificação.

f) Percentagem de sulfetos de manganês (%MnS).

A percentagem de sulfetos de manganês foi calculada pela expressão (4):

$$\%MnS = \frac{A_i}{A_T} 100\% \quad (4)$$

Onde A_i representa a área total das inclusões de sulfetos de manganês e A_T a área total da amostra.

4.3.2. Aplicação da metalografia quantitativa na caracterização do material usado.

A tabela XXI, apresenta um resumo dos resulta-

dos experimentais da aplicação da metalografia quantitativa, os quais são apresentados integralmente no apêndice I.

MATERIAL	GRUPO	GRANDEZAS REFERENTES AO MnS				
		NUMERO INCLUSÕES (N)	% MnS	L (μ)	Dmáx(μ)	F
G1	{ ± 2 }	{ $\pm 0,19$ }	{ $\pm 2,0$ }	{ $\pm 0,8$ }	{ $\pm 0,03$ }	{ ± 48 }
	16	0,98	30	10,2	0,77	605
	(4)	(0,34)	(4,0)	(1,3)	(0,05)	(82)
G2	{ ± 1 }	{ $\pm 0,08$ }	{ $\pm 2,0$ }	{ $\pm 0,7$ }	{ $\pm 0,03$ }	{ ± 59 }
	12	0,58	28	9,7	0,79	686
	(2)	(0,15)	(4,0)	(1,3)	(0,06)	(107)
G3	{ $\pm 1,0$ }	{ $\pm 0,03$ }	{ $\pm 1,0$ }	{ $\pm 0,6$ }	{ $\pm 0,03$ }	{ ± 38 }
	5	0,14	20	7	0,81	948
	(2)	(0,05)	(3,0)	(1,0)	(0,06)	(69)

OBS.: Os valores entre colchetes representam a variação da média para um intervalo de confiança de 95% e, os entre parêntesis o desvio padrão.

Tab. XXI - Resumo dos resultados experimentais da aplicação da metalografia quantitativa.

A figura 37 apresenta a variação do número de inclusões (N), do comprimento do perímetro da partícula (L), do diâmetro máximo da inclusão (Dmáx), do fator de forma (F) e da superfície específica (Si), em função da percentagem de manganês e percentual volumétrica de sulfetos de manganês.

O perímetro, diâmetro e o número de inclusões, aumentam consideravelmente para percentagens de manganês compreendidas entre 0,3 a 0,4%. Os dois primeiros, mostram-se pouco variáveis para percentagens de manganês na faixa de 0,4 a 0,6%.

A superfície específica decresce exponencialmente com o aumento da quantidade de manganês e enxofre. En-

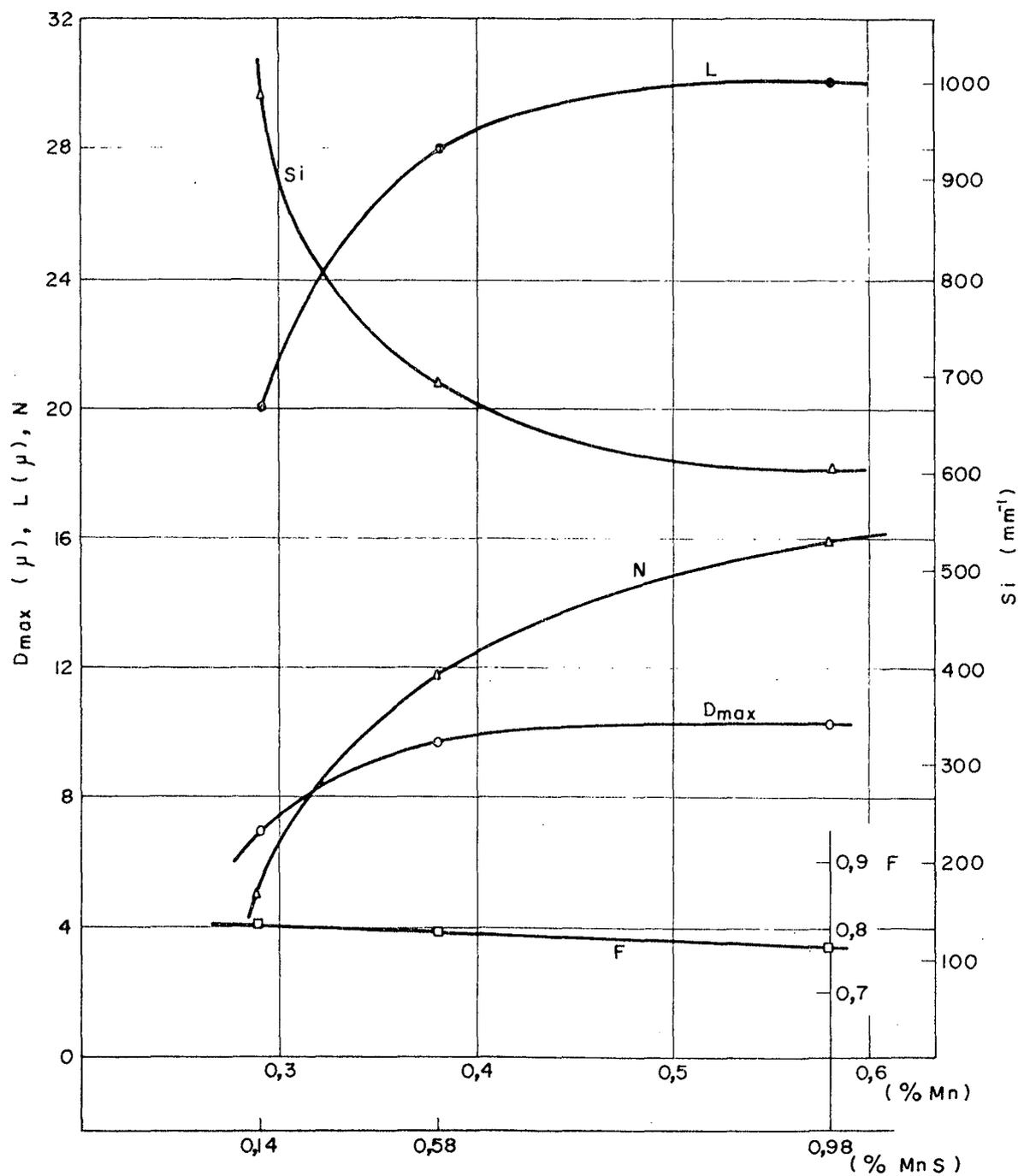


Fig. 37 - Influência da percentagem de manganês: no diâmetro máximo (D_{\max}), no comprimento do perímetro (L), no fator de forma (F), no número de inclusões (N) e, na superfície específica (Si) das inclusões de MnS .

tretanto, percentagens de manganês superior a 0,4% pouco influem para variação da superfície específica.

A figura 37 também permite concluir que o fator de forma praticamente não é influenciado pela variação de manganês e enxofre e, que a forma das inclusões de sulfetos de manganês é muito próxima da esférica.

5. ENSAIOS DE USINABILIDADE

5.1. Procedimento dos ensaios e caracterização dos parâmetros usados.

Cada ensaio consistia em usinar (tornear) um determinado corpo de prova, durante um intervalo de tempo previamente estabelecido. Após este tempo, era medido o desgaste da superfície de incidência (desgaste de flanco, VB) e da superfície de saída (desgaste de cratera, KT e KM), da ferramenta de corte. Maior importância foi dada ao desgaste da superfície de incidência. Durante cada intervalo de tempo, lia-se diretamente no indicador analógico, os valores das forças de corte (F_s), de avanço (F_v) e recuo (F_r).

Afim de reduzir ao máximo possíveis erros individuais de leitura, as experiências foram realizadas por apenas duas pessoas. Uma com a função de operar o torno e, a outra, responsável pela cronometragem do tempo, leitura no indicador analógico e medições dos desgastes das ferramentas de corte.

Durante as experiências, somente foram variadas a velocidade de corte e a composição química do material. Foi exercido sobre: o avanço, a profundidade de corte e os ângulos da ferramenta, um controle de forma que estas grandezas não sofressem nenhuma modificação no decorrer dos ensaios.

O avanço e a profundidade de corte, foram previamente aferidos (capítulo 3, item 3.8) e constatou-se um erro desprezível em relação ao valor selecionado.

O porta-ferramentas foi mantido sempre na mes-

ma posição, somente a pastilha reversível era removida para que se fizesse a medição do desgaste. Antes da sua recolocação, garantia-se a limpeza do assento com um jato de ar comprimido, assegurando desta forma a não variação dos ângulos.

A velocidade de corte (v) ou velocidade tangencial do corpo de prova, foi rigorosamente controlada por intermédio do taco-gerador e do multivoltímetro. Conhecida a relação r.p.m./volts e o diâmetro (d) do corpo de prova, era fácil determinar a tensão (volts) a ser indicada pelo multivoltímetro que correspondesse a uma velocidade de corte previamente selecionada. A tensão a ser fornecida pelo taco-gerador ao multivoltímetro é assim determinada:

$$\text{Volts} = -0,00719 + 0,00489.n \quad (5)$$

mas:

$$n = \frac{1000.v}{\pi d} \quad (6)$$

então:

$$\text{Volts} = -0,00719 + 1,55653 \frac{v}{d} \quad (7)$$

Nas expressões (5) e (6), n , representa a rotação da árvore do torno. Nas expressões (6) e (7), a velocidade de corte é representada por v (m/min) e, o diâmetro do corpo de prova pela letra d (mm). A expressão (5) representa a equação da curva de aferição do taco-gerador.

Para que os corpos de prova proporcionassem o máximo rendimento de material a usar, optou-se por montá-

los sobre um mandril. Para tanto, foi necessário o torneamento da superfície interna, com boa precisão e bom acabamento, conforme figura 25, afim de garantir uma montagem prensada sobre o mandril.

O mandril foi projetado de tal forma para que uma força máxima, mais uma sobrecarga de 50%, aplicada na parte central do seu comprimento, produzisse uma flexa não superior a 0,004 mm. Valor considerado desprezível na profundidade de corte e insuficiente para abalar a rigidez do sistema: corpo de prova - mandril. A figura 38 apresenta a forma e dimensões do mandril projetado.

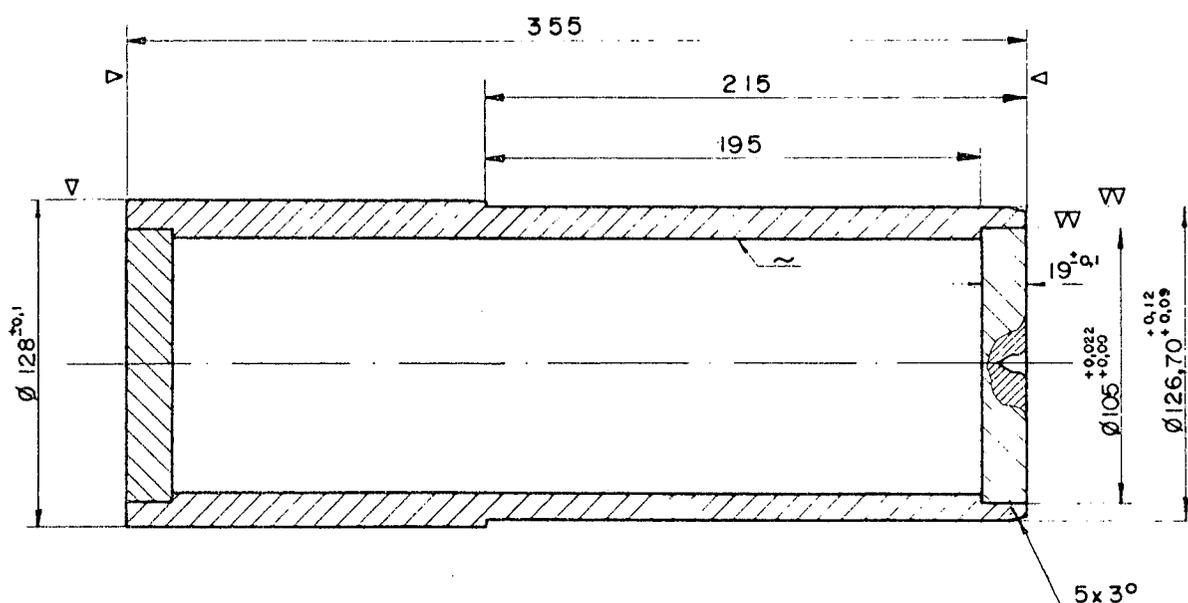


Fig. 38 - Mandril usado para a fixação dos corpos de prova.

Antes de realizar a montagem do corpo de prova sobre o mandril, foi efetuada a usinagem externa para a remoção da carepa de fundição. Uma vez o corpo de prova montado sobre o mandril, o conjunto era levado ao torno e fixado na placa de três castanhas e ponto rotativo, conforme ilustra a figura 39. Um passe de cilindragem, era realizado sobre toda a superfície externa do corpo de prova, antes dos ensaios de usinabilidade.

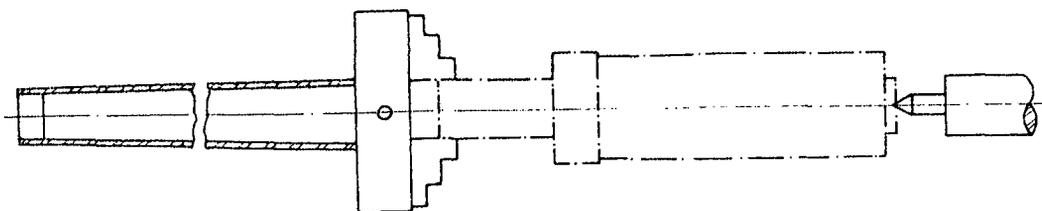


Fig. 39 - Fixação dos corpos de prova na máquina de ensaios de usinabilidade (torno I-mor P-400).

5.2. Resultados experimentais e sua análise.

As figuras 40, 41, 42 e 43, apresentam os resultados experimentais das forças de corte em função do desgaste da ferramenta, para os três tipos de materiais e as quatro velocidades de corte usadas. Os mesmos resultados estão apresentados nas tabelas do apêndice II.

Conclue-se que: existe uma tendência em aumentar as componentes da força de usinagem, à medida que aumenta o desgaste da ferramenta, apesar da dispersão dos resultados. Verifica-se ainda, que o material com maior percentagem de sulfetos de manganês (Cl) apresenta as menores forças de corte.

A dispersão dos resultados pode ser atribuída à adesão de flanco e à aresta postiça de corte. Fenômenos típicos de materiais com microestruturas totalmente ferríticas e conseqüentemente de baixa dureza. A adesão de flanco e aresta postiça de corte são resultantes de pequenas partículas que se destacam do cavaco e aderem à ferramenta. As análises nos cavacos dos três tipos de materiais usados, mostraram que estas partículas são pequenas escamas que se destacam da par-

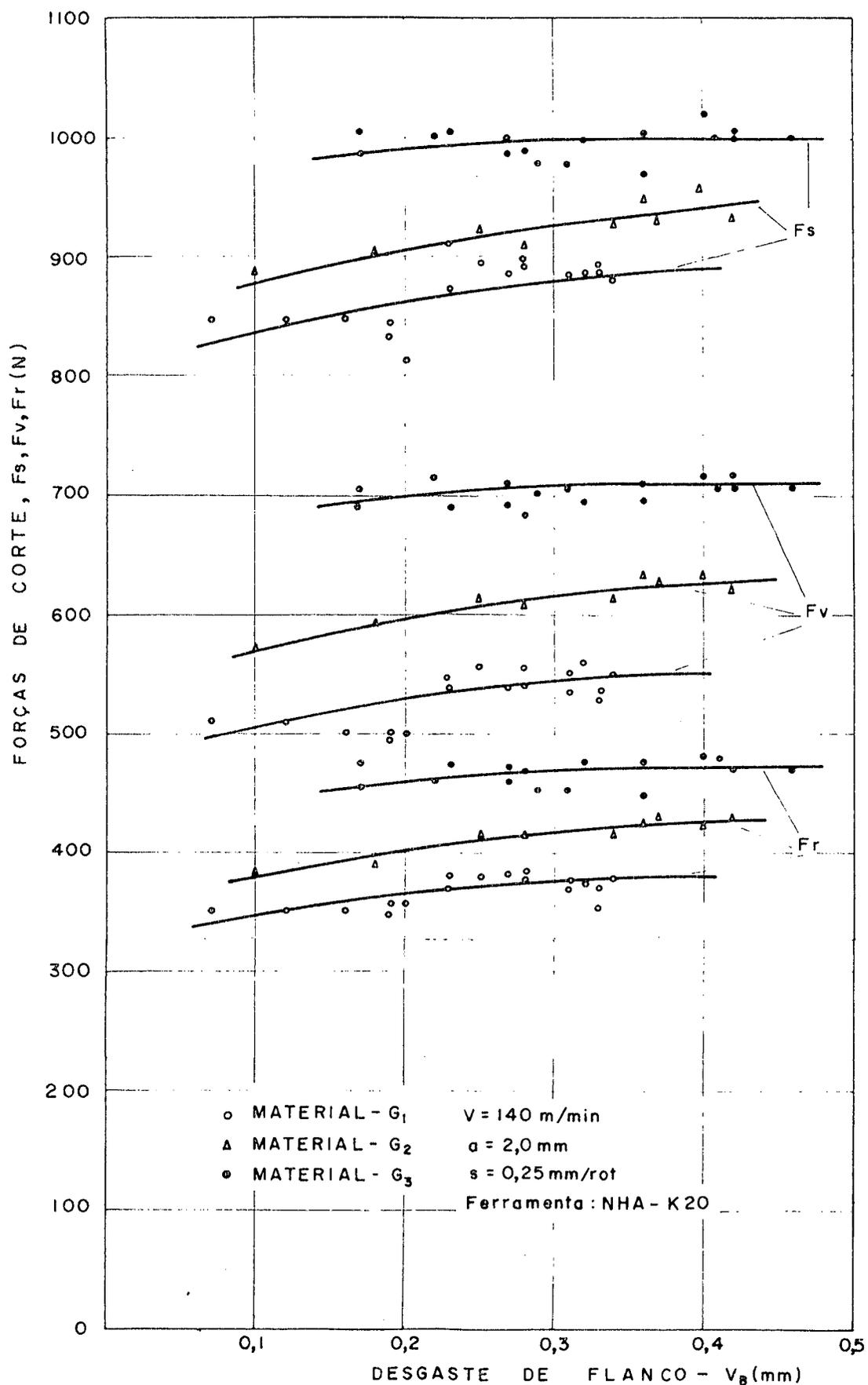


Fig. 40 - Forças de corte em função do desgaste de flanco da ferramenta, $a = 2,0$ mm, $s = 0,25$ mm/rot e $v = 140$ m/min.

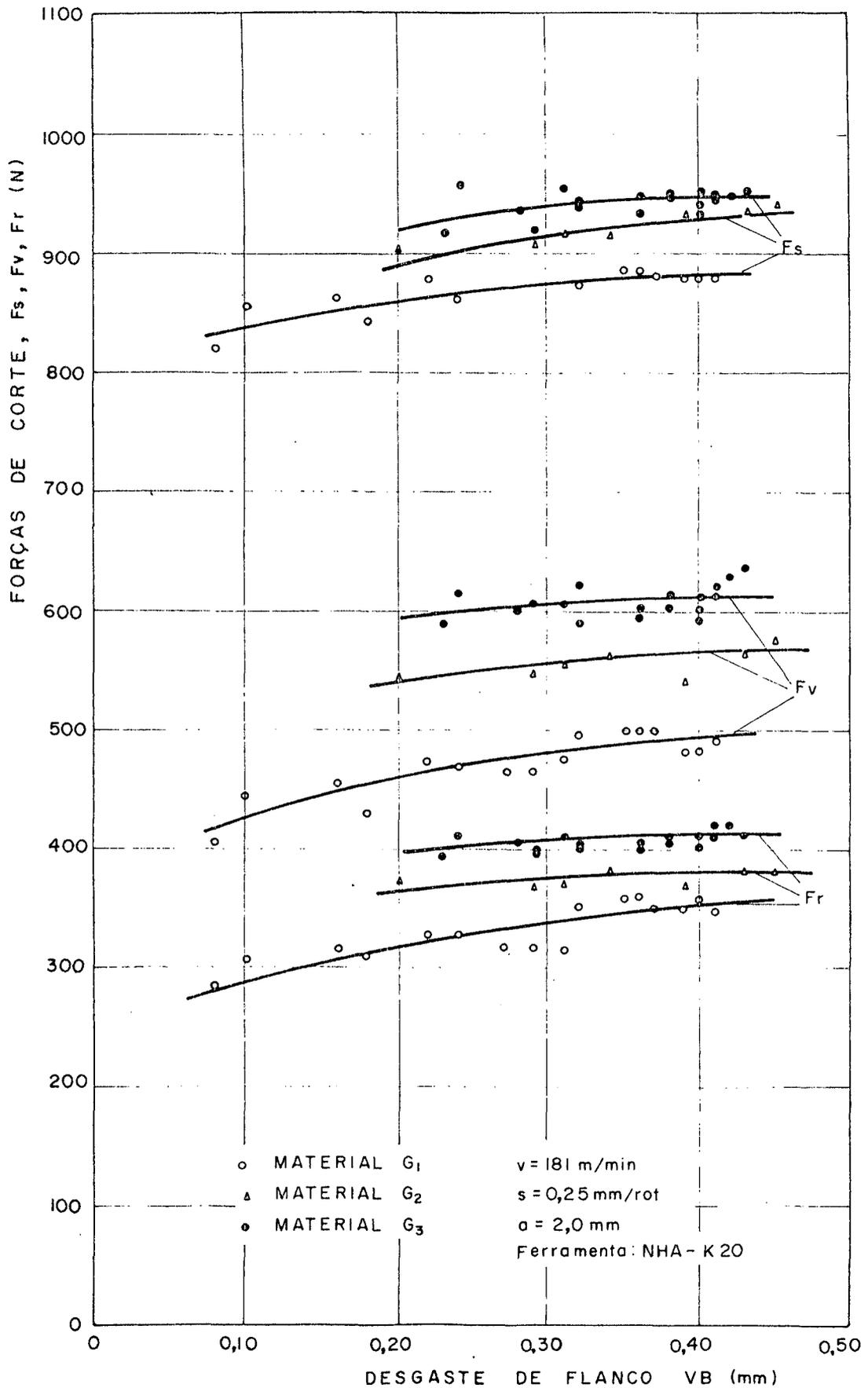


Fig. 41 - Forças de corte em função do desgaste de flanco da ferramenta, $a = 2,0$ mm, $s = 0,25$ mm/rot e $v = 181$ m/min.

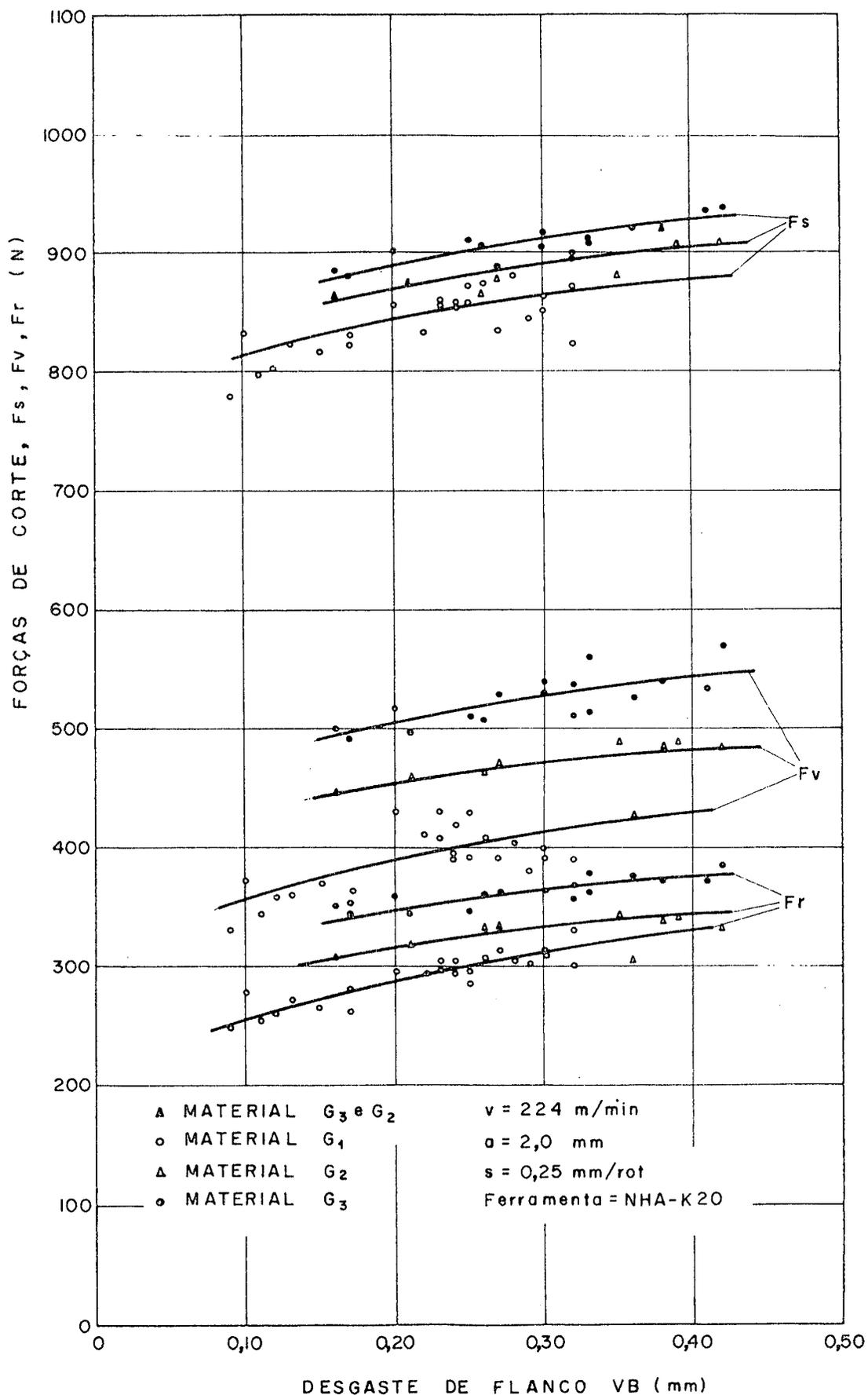


Fig. 42 - Forças de corte em função do desgaste de flanco da ferramenta, $a = 2,0$ mm, $s = 0,25$ mm/rot e $v = 224$ m/min.

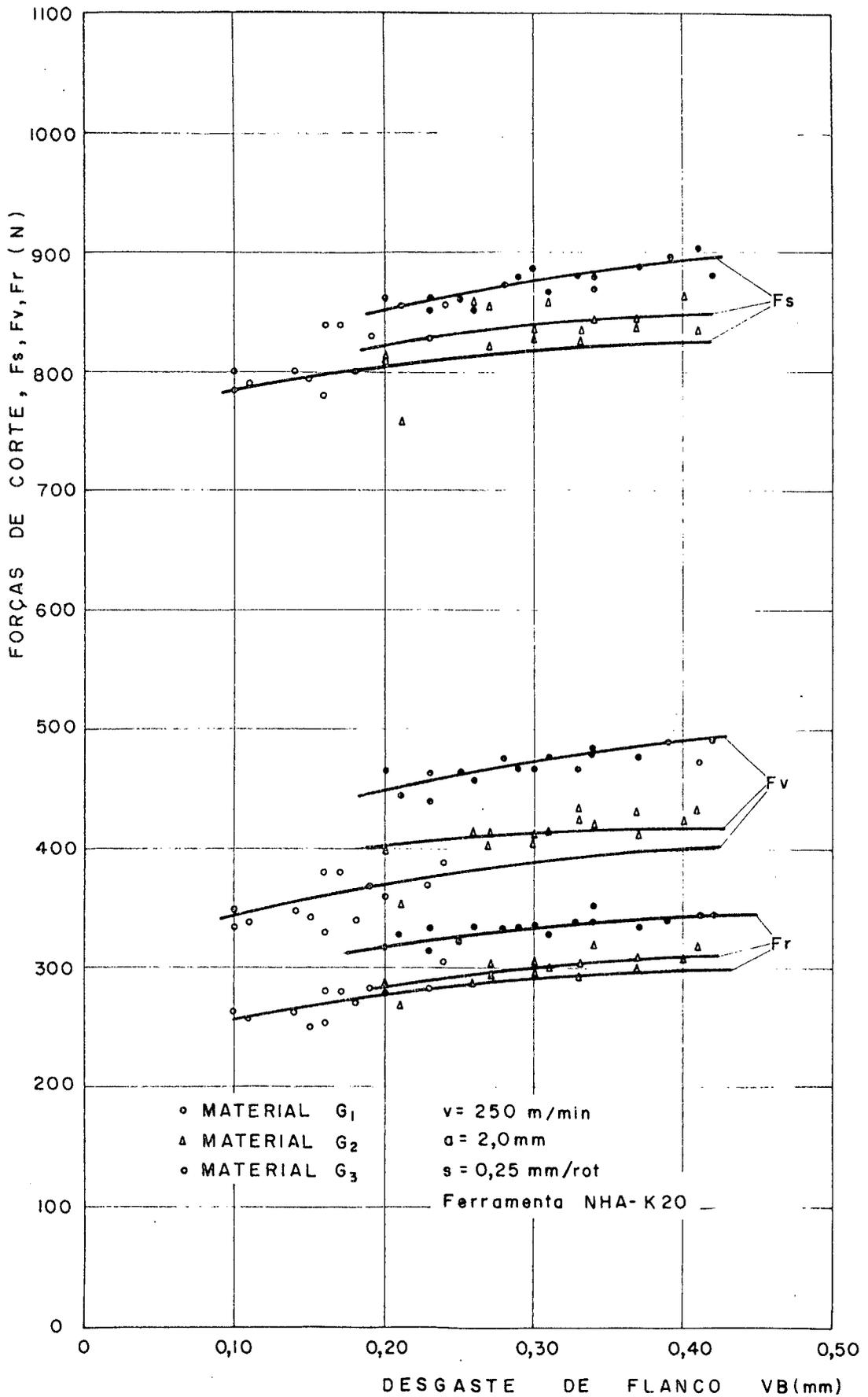


Fig. 43 - Forças de corte em função do desgaste de flanco da ferramenta, $a = 2,0$ mm, $s = 0,25$ mm/rot e $v = 250$ m/min.

te convexa do cavaco, apresentando uma cor entre o roxo e o azul. A figura 44 mostra a formação desta pequena partícula.



Fig. 44 - Formação da partícula que dá origem à adesão de flanco e à aresta postiga de corte.

Inspeções realizadas nas ferramentas, indicaram que para o material G1 com maior percentagem de MnS, a adesão de flanco e aresta postiga de corte não são tão intensas, mesmo nas velocidades mais baixas.

Das figuras 40, 41, 42 e 43, resulta a tabela XXII. Nela, constam os valores das forças de corte em função da velocidade e do tipo de material, para $V_B = 0,40$ mm.

Verifica-se na tabela XXII, que as forças de corte diminuem com o aumento da percentagem de MnS na composição do material. Este efeito também pode ser constatado na figura 45. A redução na força de avanço atinge aproximadamente 30% entre os materiais G1 e C3, para a velocidade de 140 m/min. Observa-se também que a força de avanço apresenta os maiores percentuais de redução devido a variação de MnS.

MATERIAL CRUPO	VELOCIDADE DE CORTE v(m/min)	FORÇAS DE CORTE E PERCENTUAIS COMPARATIVOS								
		F _s (N)	%		F _v (N)	%		F _r (N)	%	
G1	140	890	6	12	550	13	14	376	10	13
G2		940	6	12	628	13	14	426	10	13
G3		1000	6	12	710	13	14	468	10	13
G1	181	880	2	8	494	8	14	354	8	7
G2		930	2	8	564	8	14	378	8	7
G3		950	2	8	608	8	14	408	8	7
G1	224	878	3	6	432	13	12	332	10	3
G2		905	3	6	482	13	12	343	10	3
G3		930	3	6	544	13	12	376	10	3
G1	250	833	5	7	402	13	6	300	12	4
G2		844	5	7	426	13	6	311	12	4
G3		888	5	7	482	13	6	348	12	4

Tab. XXII - Forças de corte (para $V_B = 0,40$ mm) e percentuais comparativos, para os três tipos de materiais e as quatro velocidades de corte usadas.

A figura 45 apresenta a influência do aumento da percentagem de sulfeto de manganês nas forças de corte para $V_B = 0,40$ mm nas quatro velocidades usadas.

Considerando uma mesma velocidade de corte, a redução obtida nas forças de corte devido ao aumento da percentagem de sulfetos de manganês, deve-se ao efeito lubrificante adicional proporcionado pelas inclusões de MnS.

A figura 46 apresenta as forças de corte em função da velocidade para desgaste $V_B = 0,40$ mm.

Conclue-se que: a força de corte, avanço e recuo diminuem com o aumento da velocidade de corte. Esta diminuição pode ser explicada através da redução da resistência do material do corpo de prova, em virtude do aumento da tempe

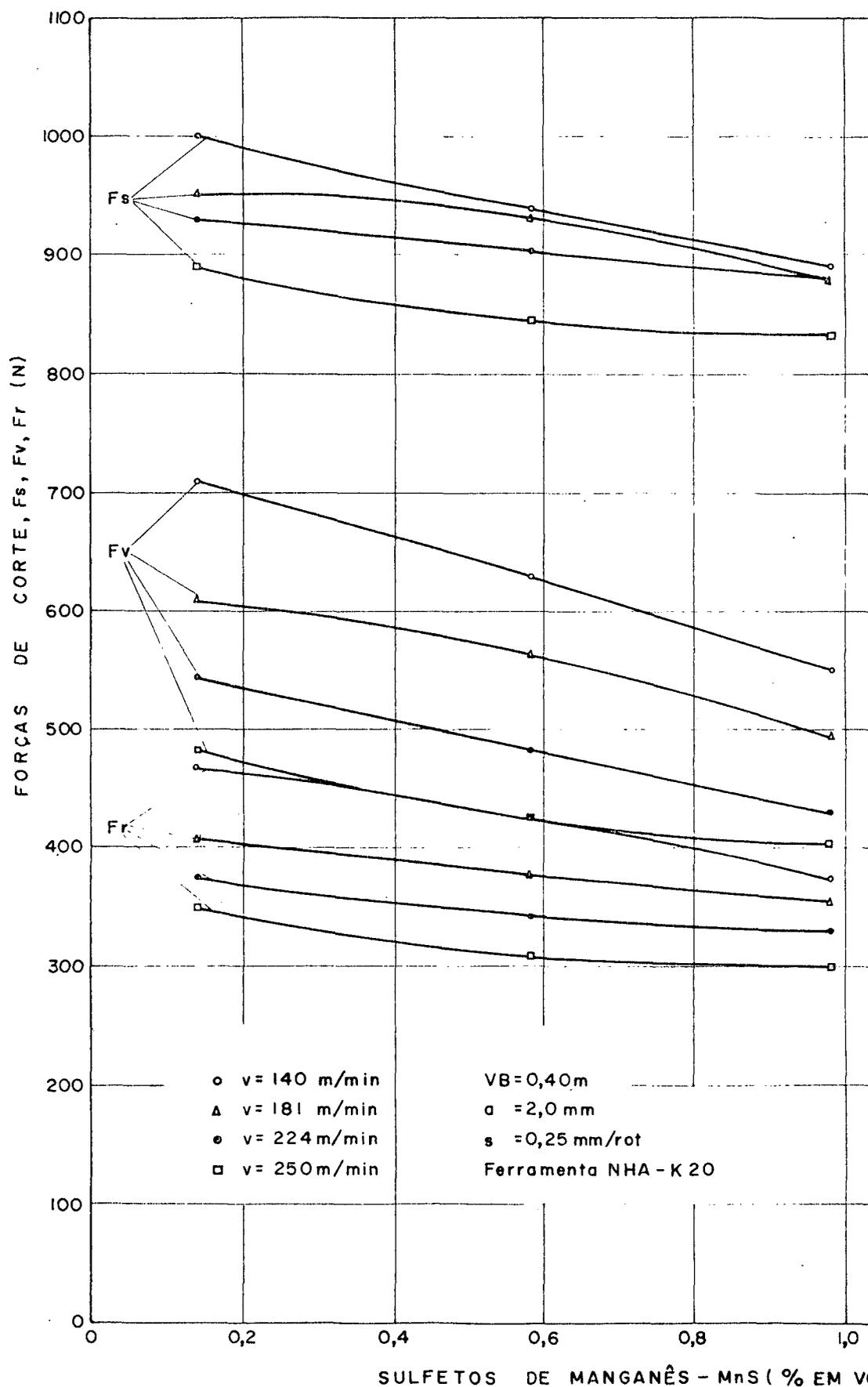


Fig. 45 - Influência do aumento da percentagem de sulfetos de manganês nas forças de corte, para velocidades de 140, 181, 224 e 250 m/min, $s = 0,25$ mm/rot, $a = 2,0$ mm.

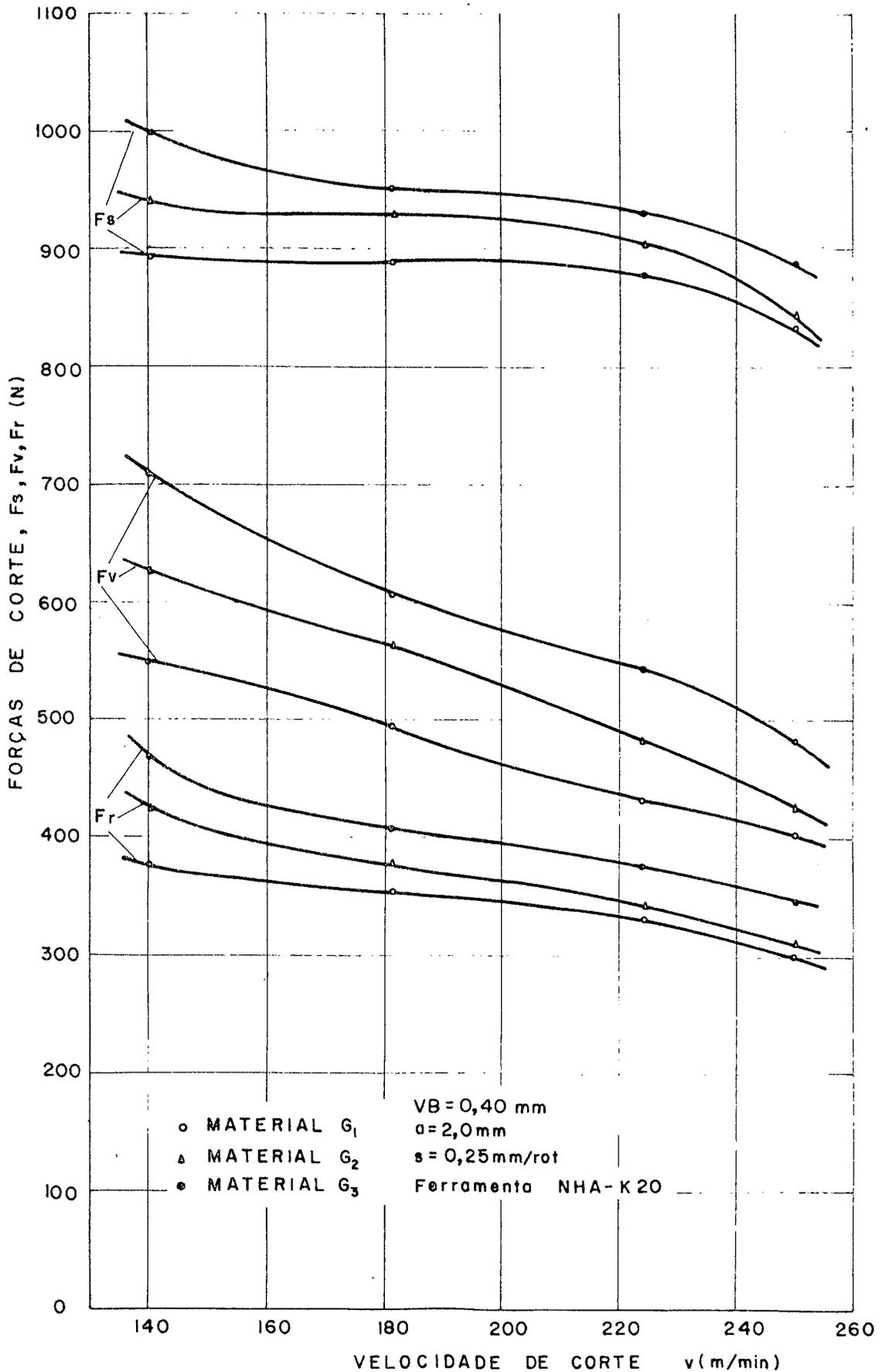


Fig. 46 - Forças de corte em função da velocidade, para $VB = 0,40$ mm, $s = 0,25$ mm/rot, $a = 2,0$ mm.

ratura e, menor tendência à adesão de flanco e à formação da aresta postiça de corte.

A tabela XXIII apresenta os resultados experimentais referentes ao volume de material cortado para as quatro velocidades e os três grupos de materiais usados.

VOLUME DE MATERIAL CORTADO EM FUNÇÃO DA VEL. E MAT.				
MATERIAL GRUPO	VELOCIDADE DE CORTE v(m/min)	VOLUME DE MATE RIAL CORTADO v(cm ³ /min)	VALOR MEDIO v(cm ³ /min)	DESVIO PADRÃO
G1	140	70,7	71,9	1,1 {±3,3}
G2		72,8		
G3		72,2		
G1	181	89,5	89,1	0,9 {±2,8}
G2		88,0		
G3		89,7		
G1	224	117,5	116,2	2,6 {±4,1}
G2		113,2		
G3		117,8		
G1	250	128,6	127,7	1,3 {±3,2}
G2		126,7		
G3		128,9		

OBS.: Os valores entre colchetes representam a variação da média para intervalo de confiança de 95%.

Tab. XXIII - Volume de material cortado para as quatro velocidades usadas.

Como era de se esperar, o volume de material é diretamente proporcional a velocidade de corte, conforme ilus

tra a figura 47. A variação apresentada pelos resultados foi inferior a 4%, isto permite concluir que a velocidade de corte foi muito bem controlada durante a realização dos ensaios.

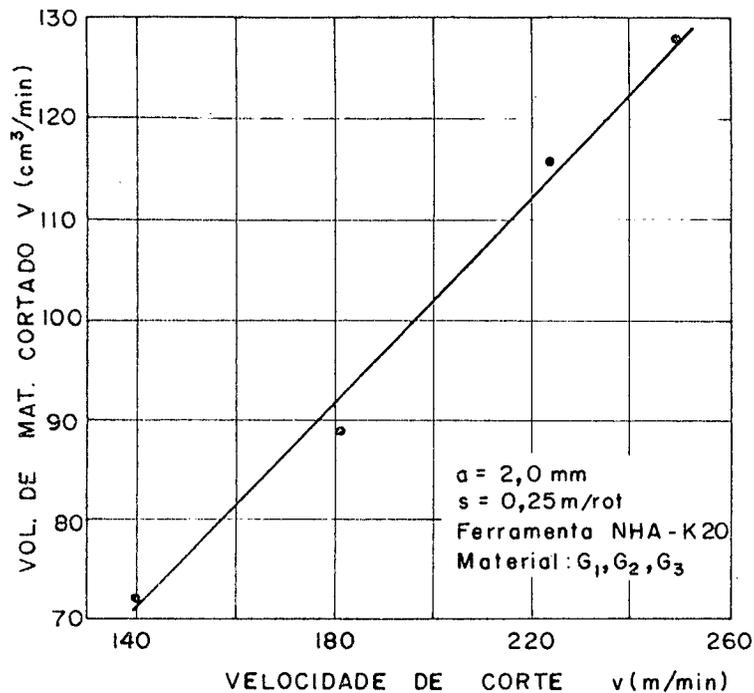


Fig. 47 - Volume de material cortado em função da velocidade de corte.

As figuras 48, 49, 50 e 51 apresentam o desgaste médio de flanco (VB) das ferramentas, em função do tempo de usinagem e tipo de material, para as velocidades de corte de: 140, 181, 224 e 250 m/min, respectivamente.

Nas condições de corte usadas para este material e, para um desgaste da ferramenta $VB = 0,40 \text{ mm}$ verifica-se que: as curvas obtidas nesta experiência, quando comparadas às apresentadas na literatura (figura 3, capítulo 2) não atingem a região na qual ocorre um patamar de desgaste com o aumento do tempo de usinagem.

É comum representar o desgaste da ferramenta em função do tempo de usinagem através de algum modelo matemático, como por exemplo:

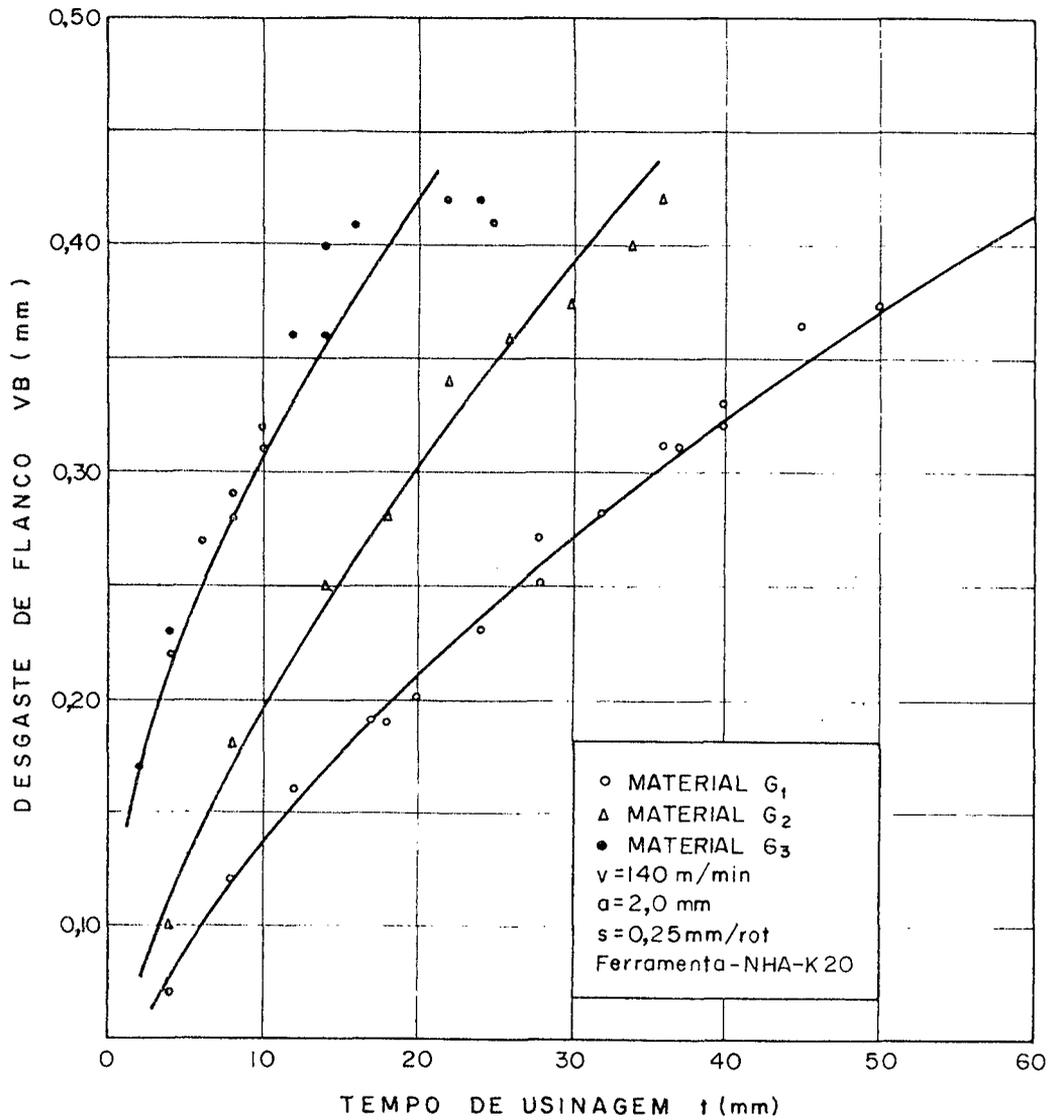


Fig. 48 - Desgaste de flanco em função do tempo de usinagem, $a = 2,0$ mm, $s = 0,25$ mm/rot e $v = 140$ m/min.

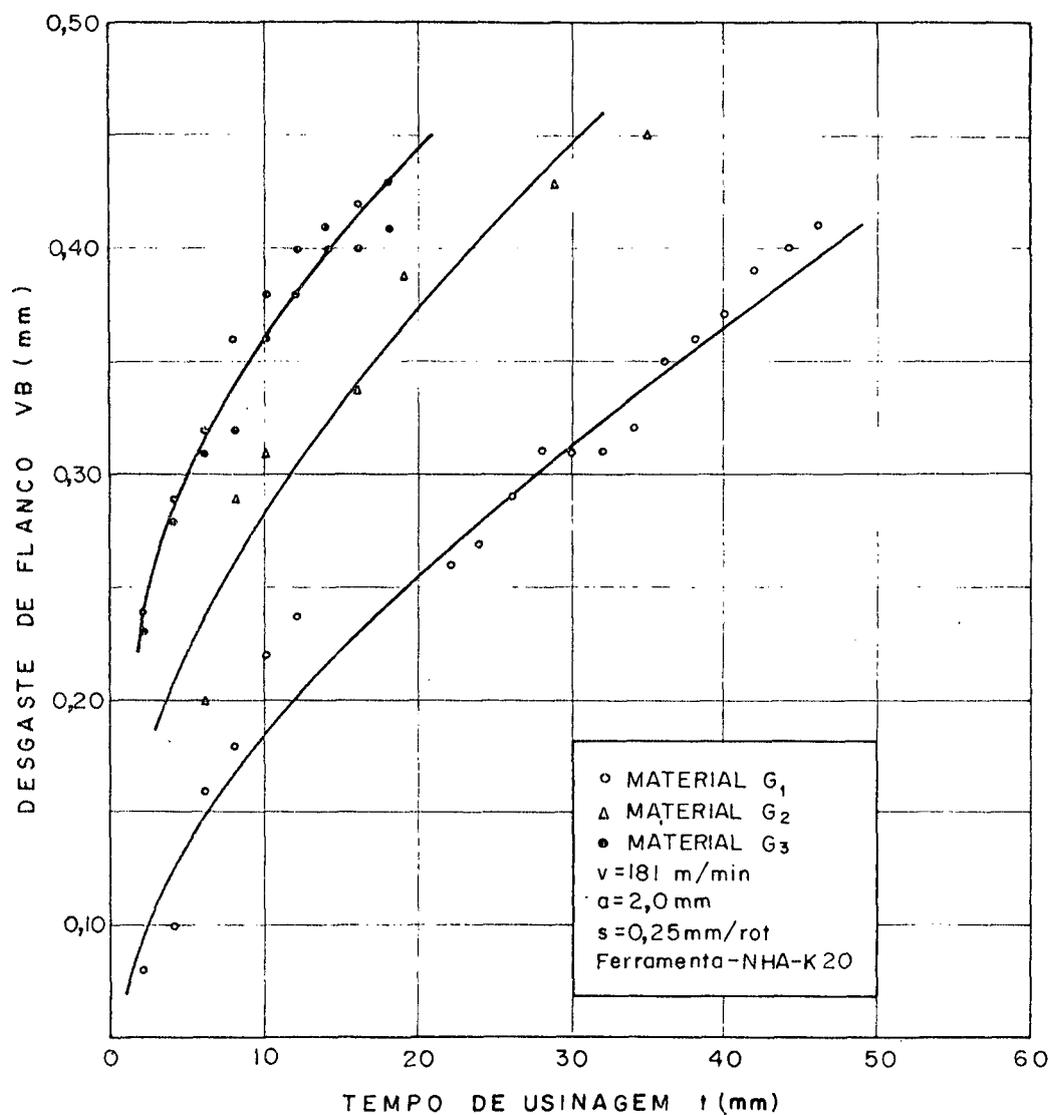


Fig. 49 - Desgaste de flanco em função do tempo de usinagem, $a = 2,0$ mm, $s = 0,25$ mm/rot e $v = 181$ m/min.

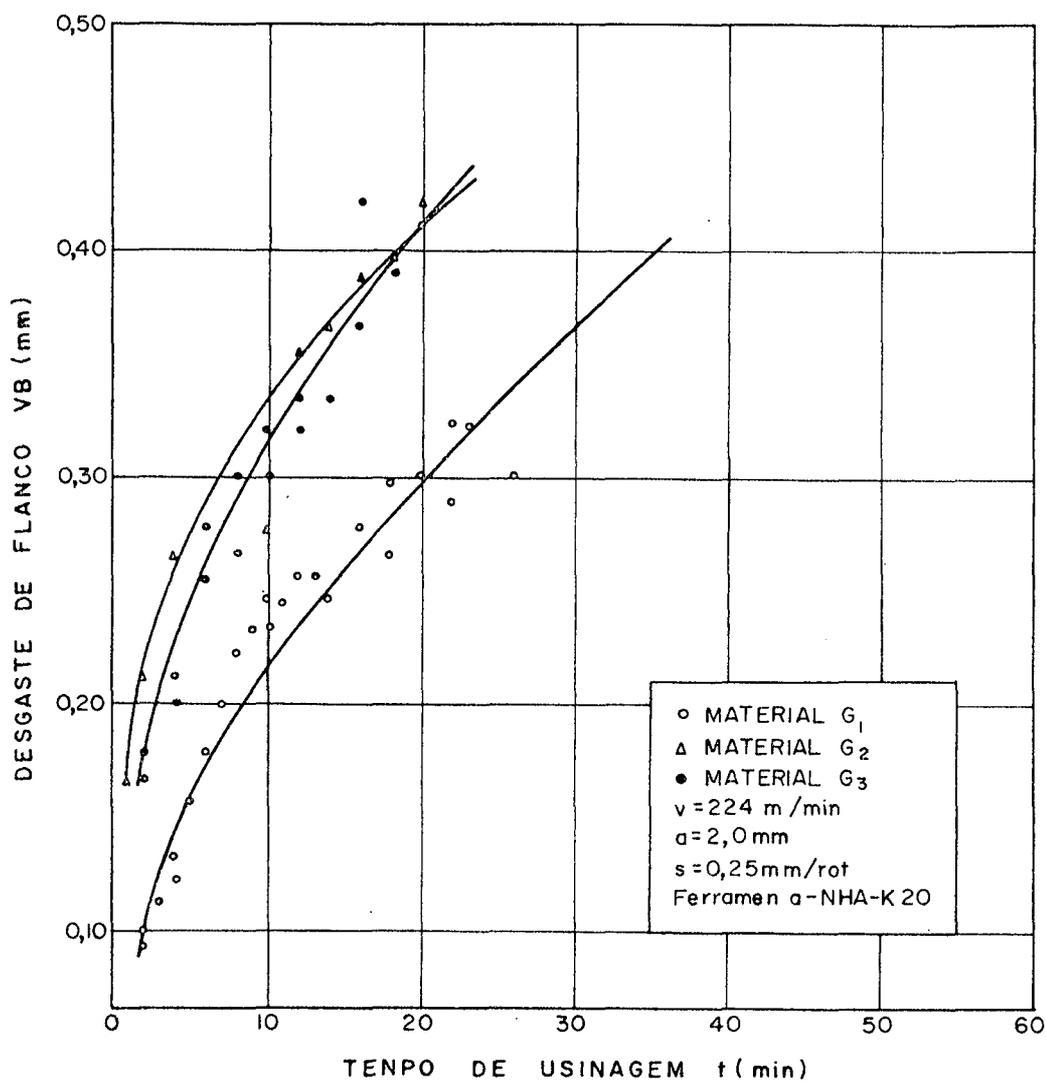


Fig. 50 - Desgaste de flanco em função do tempo de usinagem, $a = 2,0$ mm, $s = 0,25$ mm/rot e $v = 224$ m/min.

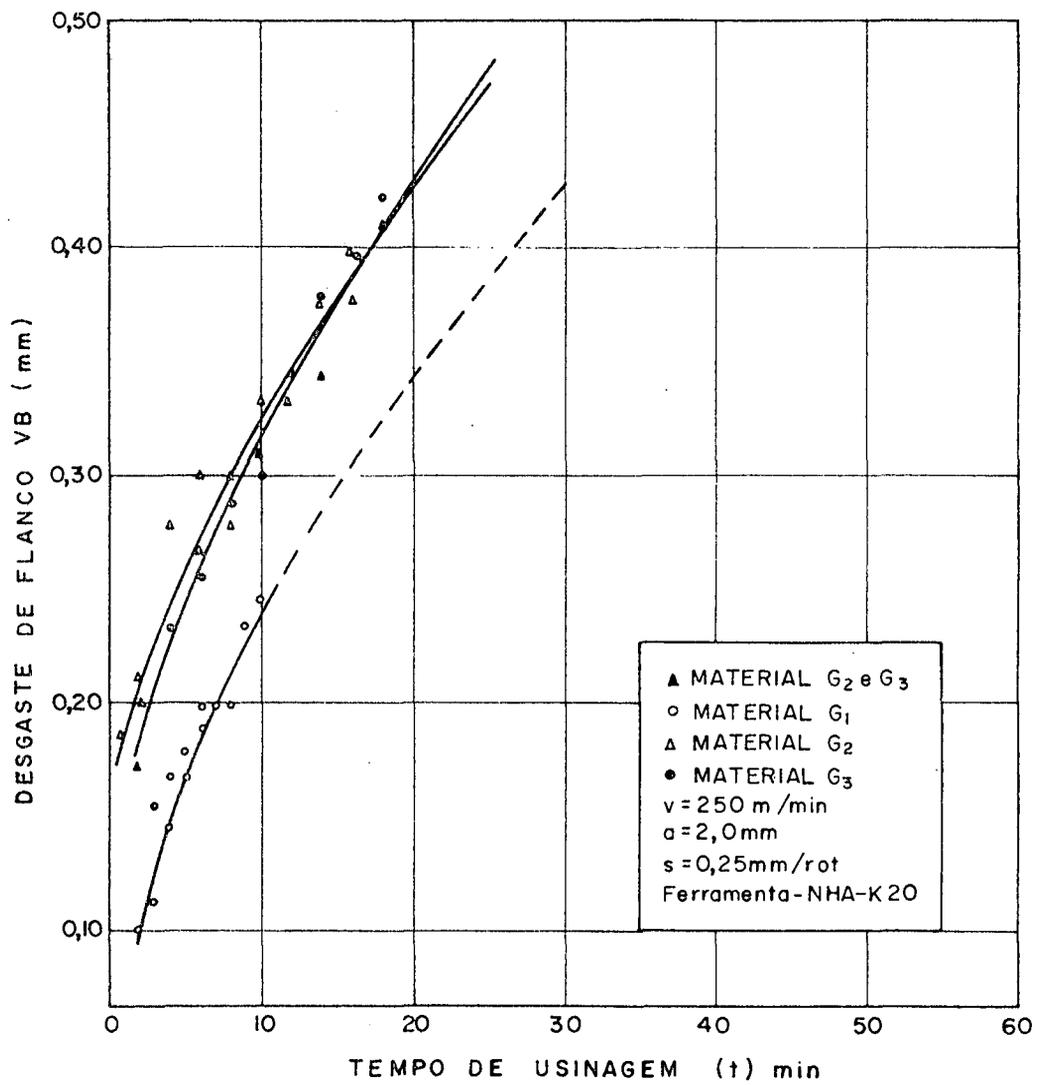


Fig. 51 - Desgaste de flanco em função do tempo de usinagem, $a = 2,0 \text{ mm}$, $s = 0,25 \text{ mm/rot}$ e $v = 250 \text{ m/min}$.

$$y = ax^b \quad (8)$$

$$\ln y = \ln a + b \cdot \ln x \quad (9)$$

$$y = a_0 + a_1 x \quad (10)$$

Os coeficientes a , b , a_0 e a_1 são apresentados na tabela XXIV.

Geralmente os modelos das expressões (8) e (9) são usados para descrever o desgaste da ferramenta em função do tempo de usinagem (13), no entanto, alguns pesquisadores (31) usam o modelo representado pela expressão (10). Para $VB=0,40$ mm, critério de fim de vida da ferramenta adotado neste trabalho, todos os modelos apresentam praticamente os mesmos resultados, conforme pode ser visto na tabela XXIV. Entretanto, o coeficiente de determinação (r^2) dos dois primeiros modelos indicam que estes se adaptam melhor ao dados experimentais que o terceiro.

As figuras 52, 53, 54 e 55 apresentam as curvas para os modelos das expressões (8) e (9). Estas e às das figuras 48, 49, 50 e 51 permitem concluir que:

- o maior efeito dos sulfetos de manganês está presente nas velocidades de 140 e 181 m/min, aumentando a vida da ferramenta da ordem de 220% e 230%, respectivamente, aumento obtido entre os materiais G3 e G1. Para estas velocidades, os resultados apresentados pelos três grupos de materiais são bem distintos entre si;

- nas velocidades de 224 e 250 m/min, o aumento na vida da ferramenta é de aproximadamente 90% e 35%, respectivamente e, igualmente válido para a comparação entre os materiais G3 e G1. Para estas velocidades, os resultados experimentais apresentados pelos materiais G2 e G3, estão muito próximos entre si. Entre as várias causas que podem contribuir

MATERIAL	VELOCIDADE DE CORTE v(m/min)	y = a.x ^b				y = a ₀ + a ₁ .x					
		a	b	r ²	r	VIDA DA FERRAMENTA T(min)	a ₀	a ₁	r ²	r	VIDA DA FERRAMENTA T(min)
G1	140	0,031	0,630	0,990	0,995	57	0,083	0,006	0,955	0,977	54
G2		0,041	0,631	0,987	0,993	31	0,102	0,009	0,955	0,978	32
G3		0,134	0,375	0,948	0,974	18	0,182	0,013	0,883	0,938	17
G1	181	0,060	0,492	0,967	0,984	47	0,114	0,006	0,949	0,974	44
G2		0,114	0,401	0,901	0,949	23	0,214	0,007	0,868	0,932	25
G3		0,195	0,272	0,973	0,986	14	0,240	0,011	0,909	0,954	14
G1	224	0,069	0,490	0,957	0,978	36	0,113	0,009	0,868	0,932	32
G2		0,164	0,296	0,950	0,975	20	0,178	0,012	0,940	0,970	18
G3		0,123	0,398	0,965	0,982	19	0,161	0,014	0,924	0,961	18
G1	250	0,071	0,525	0,934	0,966	27	0,077	0,017	0,931	0,965	19
G2		0,167	0,289	0,922	0,960	21	0,198	0,012	0,924	0,962	17
G3		0,152	0,321	0,943	0,971	20	0,178	0,013	0,988	0,994	17

Tab. XXIV - Coeficientes a, b, a₀, a₁ e vida da ferramenta para as expressões (8), (9) e (10)

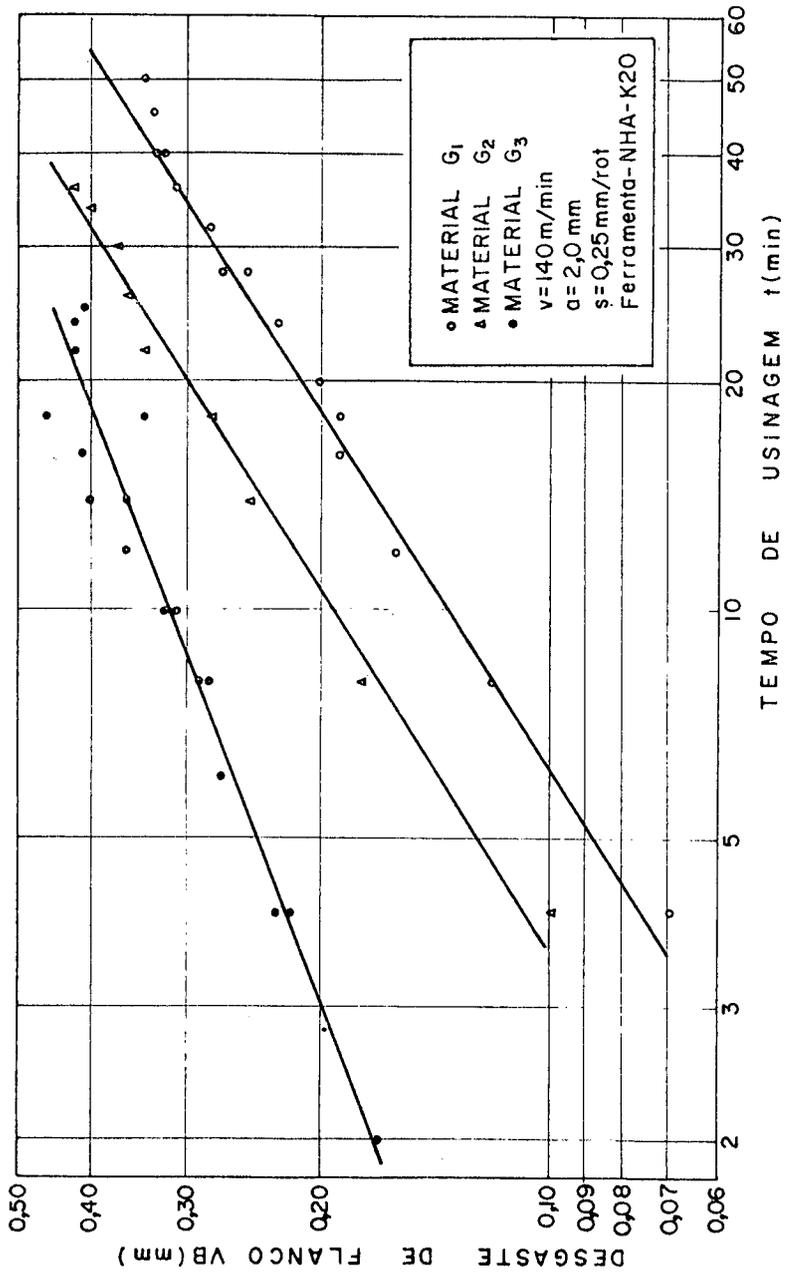


Fig. 52 - Desgaste de flanco em função do tempo de usinagem, $a = 2,0$ mm, $s = 0,25$ mm/rot e $v = 140$ m/min.

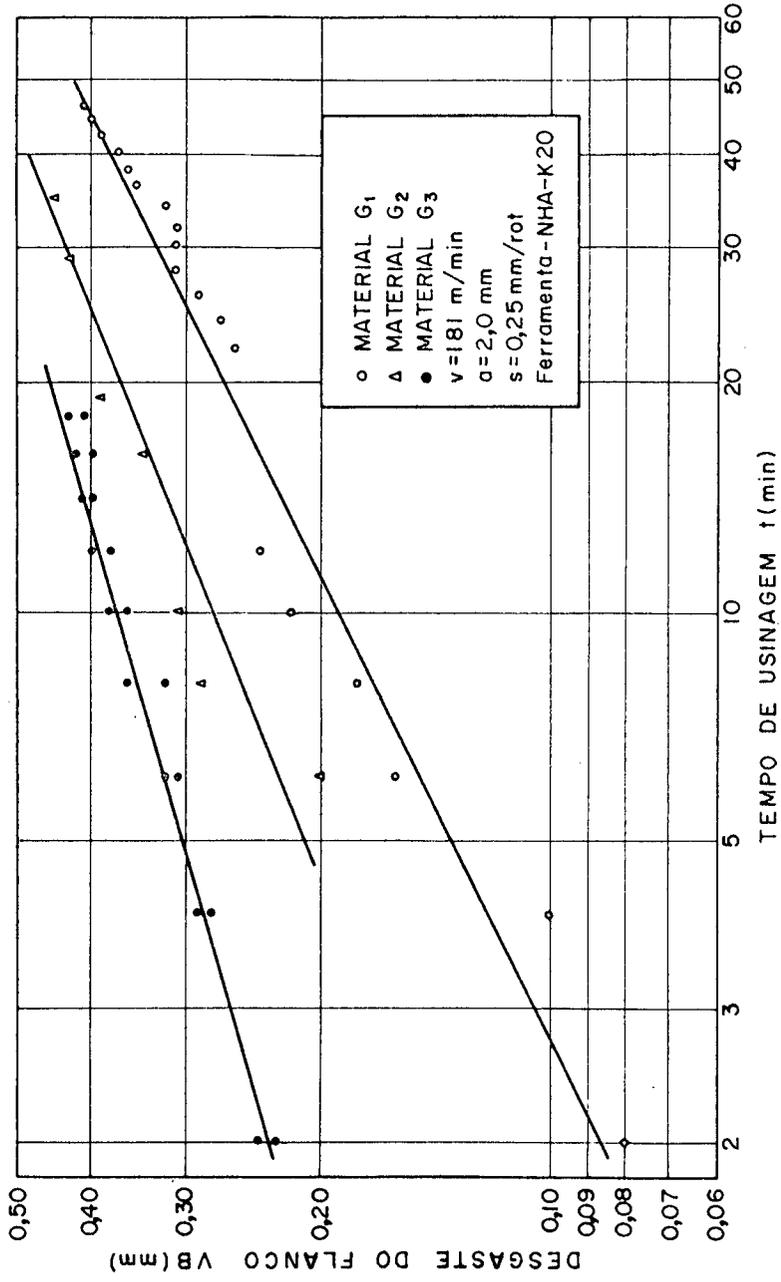


Fig. 53 - Desgaste de flanco em função do tempo de usinagem, a = 2,0 mm, s = 0,25 mm/rot e v = 181 m/min.

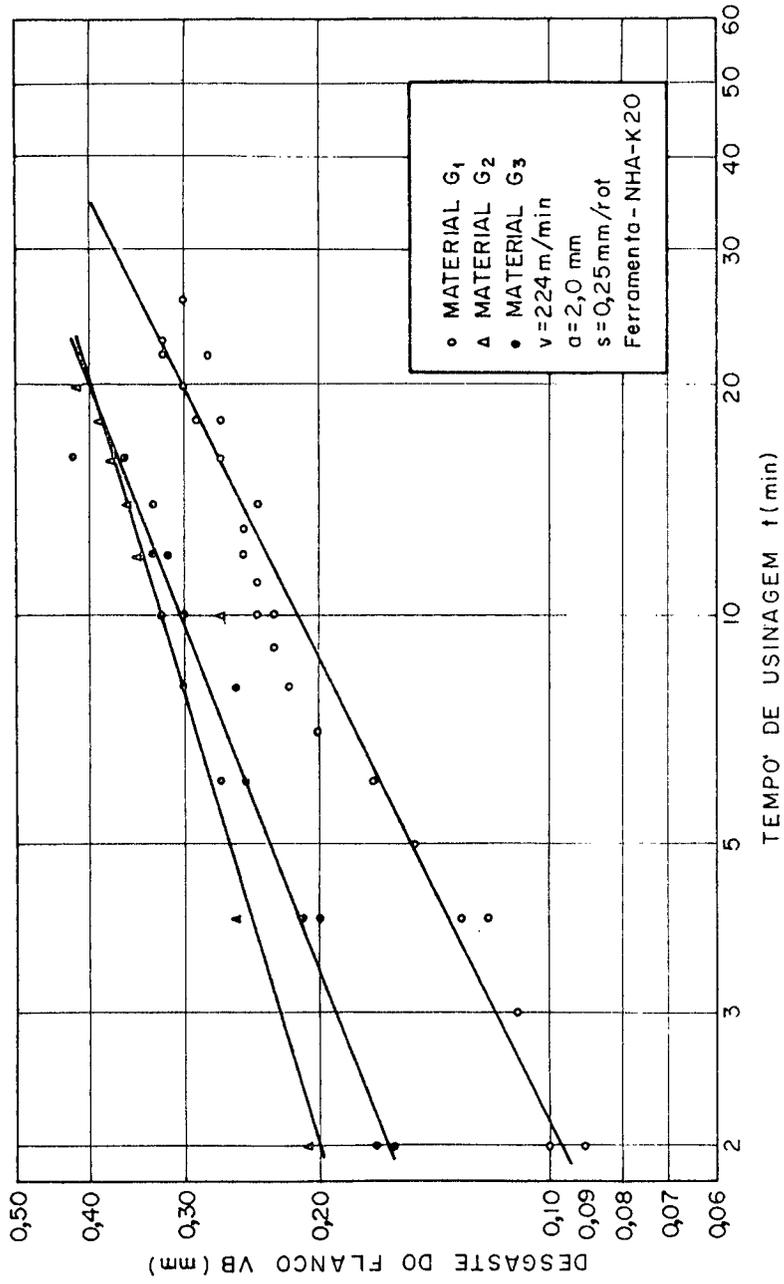


Fig. 54 - Desgaste de flanco em função do tempo de usinagem, $a = 2,0$ mm, $s = 0,25$ mm/rot e $v = 224$ m/min.

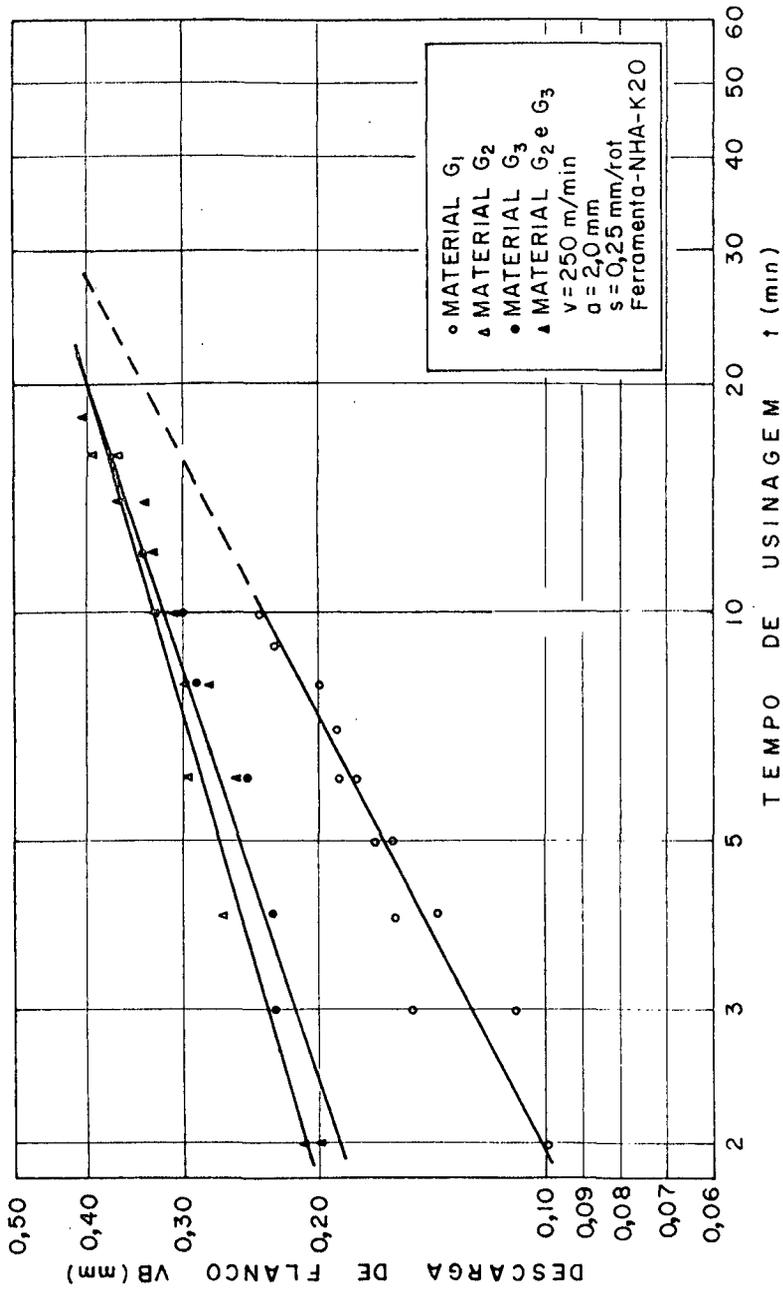


Fig. 55 - Desgaste de flanco em função do tempo de usinagem, $a = 2,0$ mm, $s = 0,25$ mm/rot e $v = 250$ m/min.

para este efeito, deve-se mencionar que é necessário uma quantidade ótima de MnS para garantir adequada lubrificação em altas velocidades. É possível que uma quantidade inferior a G2 e G3 não seja suficiente para demonstrar este efeito claramente. Além disso é possível que nesta faixa de velocidades exista uma mudança no mecanismo de desgaste;

- o aumento obtido na vida da ferramenta deve-se basicamente ao efeito lubrificante adicional proporcionado pelos MnS.

A figura 56 apresenta a vida da ferramenta em função da percentagem de sulfetos de manganês.

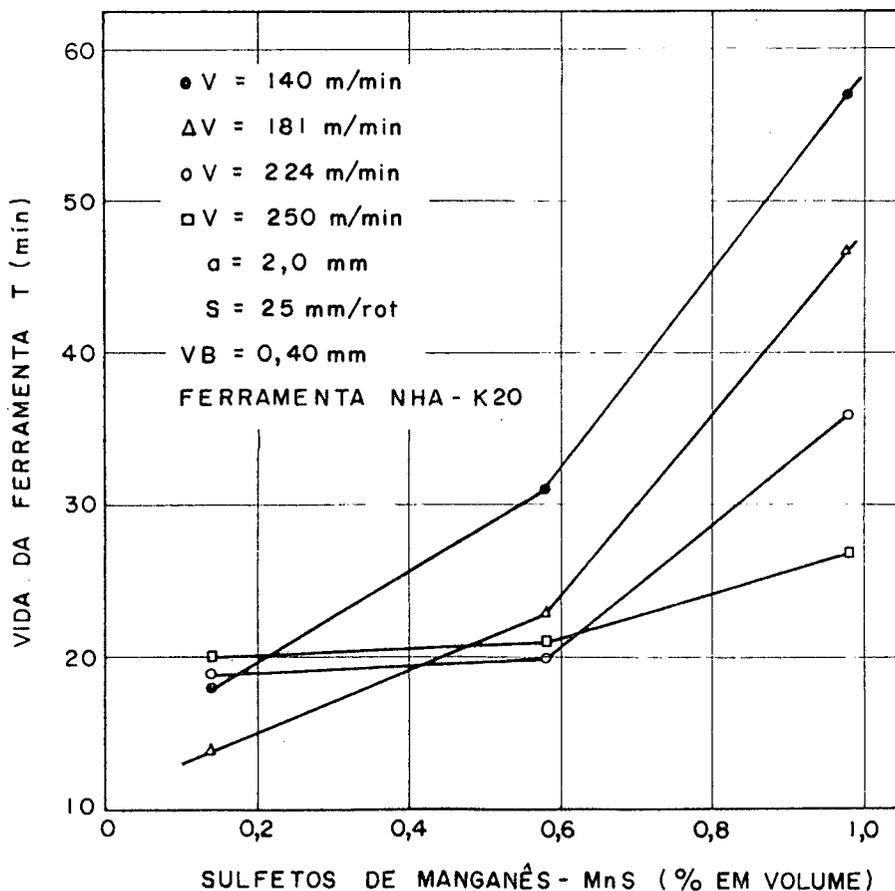


Fig. 56 - Vida da ferramenta em função da percentagem volumétrica de MnS, para as velocidades de: 140, 181, 224 e 250 m/min, $s = 0,25$ mm/rot e $a = 2,0$ mm.

Conclue-se que: para as velocidades de 140 e 181 m/min, a vida da ferramenta aumenta para percentagens de MnS superior a 0,14% e que o efeito maior está nas percentagens superior a 0,6%. Nas velocidades de 224 e 250 m/min, o aumento na vida da ferramenta é insignificante para quantidade de MnS inferior a 0,6%. O efeito neste caso só começa a aparecer acima de 0,6% de MnS.

As figuras 57 e 58 apresentam a vida da ferramenta em função da velocidade de corte (curvas de vida da ferramenta) para os três grupos de materiais. Em ambas as figuras, o material G1 mostra um efeito altamente benéfico na vida da ferramenta, em relação aos materiais G2 e G3. Os materiais G2 e G3, sendo usinados com velocidades de 224 e 250 m/min, praticamente apresentam a mesma vida da ferramenta para as duas velocidades. Entretanto, para as velocidades de 140 e 181 m/min, os materiais G2 e G3 também apresentam um efeito benéfico na vida da ferramenta. Na figura 57, para o material G2 não foi usado o ponto referente a 250 m/min, para o traçado da curva. No traçado da curva referente ao material G3, não foram usados os pontos de 224 e 250 m/min.

A tabela XXV apresenta um resumo dos benefícios obtidos na vida das ferramentas e na redução das forças de corte.

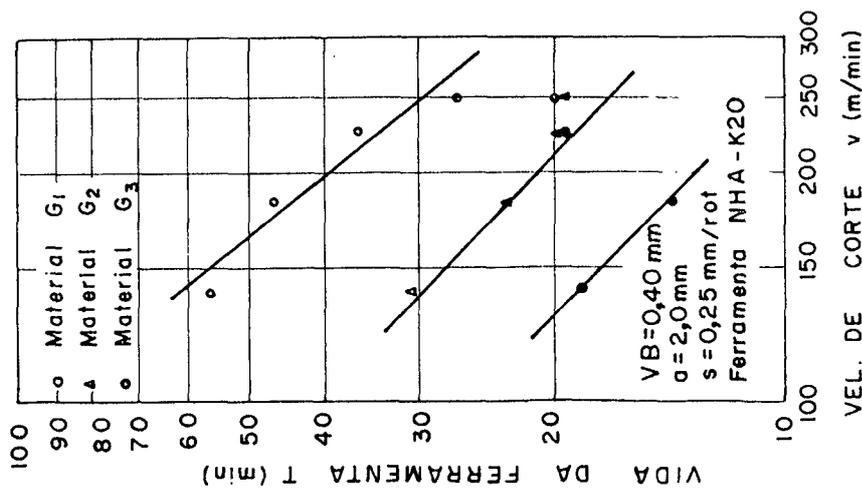


Fig. 57 - Curvas de vida das ferramentas. a=2,0 mm; s=0,25 mm/rot; VB=0,40 mm

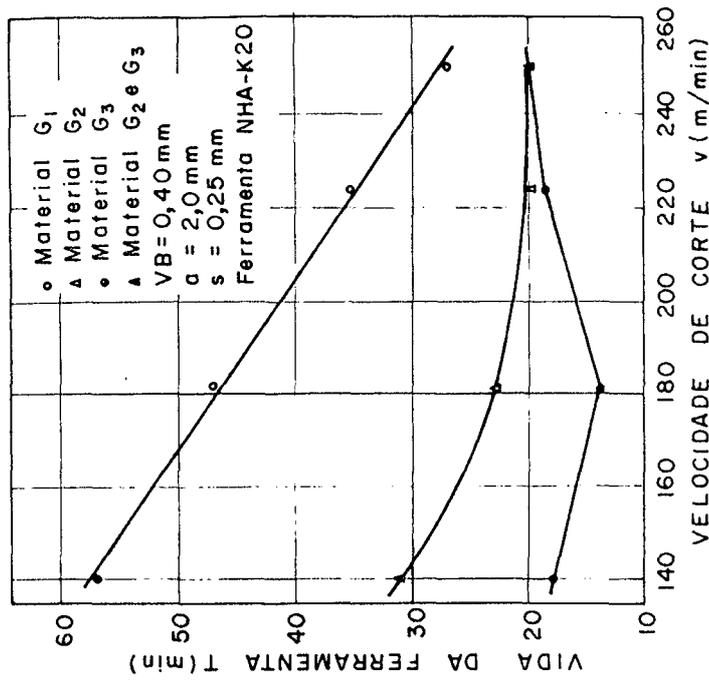


Fig. 58 - Curvas de vida das ferramentas. a=2,0 mm; s=0,25 mm/rot; VB=0,40 mm

MATERIAL GRUPO	VELOCIDADE DE CORTE. v (m/min)	VIDA DA FERRAMENTA. T (min)	PERCENTUAL COMPARATIVO, VALIDO PARA VIDA DA FERRAMENTA E VOLUME DE MATERIAL CORTADO. %	VOLUME DE MATERIAL CORTADO. V (cm ³)	FORÇAS DE CORTE E PERCENTUAIS COMPARATIVOS					
					F _s (N)	%	F _v (N)	%	F _r (N)	%
G1		57	▲ 72 ▲ 84 ▲ 217	4098	890	▲ 5 ▲ 12	550	▲ 13 ▲ 14 ▲ 29	376	▲ 10 ▲ 13 ▲ 24
G2	140	31	▲ 64 ▲ 104 ▲ 236	2220	940	▲ 2 ▲ 8	628	▲ 8 ▲ 14 ▲ 23	426	▲ 7 ▲ 15
G3		18	▲ 5 ▲ 80 ▲ 89	1294	1000	▲ 3 ▲ 5	710	▲ 13 ▲ 12 ▲ 26	468	▲ 10 ▲ 13
G1		47	▲ 5 ▲ 29 ▲ 35	4188	880	▲ 5 ▲ 7	494	▲ 13 ▲ 18 ▲ 20	354	▲ 12 ▲ 16
G2	181	23	▲ 5 ▲ 80 ▲ 89	2049	930	▲ 2 ▲ 5	564	▲ 8 ▲ 12 ▲ 26	378	▲ 8 ▲ 13
G3		14	▲ 5 ▲ 29 ▲ 35	1247	950	▲ 3 ▲ 5	608	▲ 13 ▲ 18 ▲ 20	408	▲ 8 ▲ 10
G1		36	▲ 5 ▲ 80 ▲ 89	4183	878	▲ 3 ▲ 5	432	▲ 13 ▲ 18 ▲ 26	332	▲ 10 ▲ 13
G2	224	20	▲ 5 ▲ 80 ▲ 89	2324	905	▲ 3 ▲ 5	482	▲ 13 ▲ 18 ▲ 26	343	▲ 10 ▲ 13
G3		19	▲ 5 ▲ 29 ▲ 35	2208	930	▲ 3 ▲ 5	544	▲ 13 ▲ 18 ▲ 20	376	▲ 10 ▲ 13
G1		27	▲ 5 ▲ 29 ▲ 35	3448	833	▲ 5 ▲ 7	402	▲ 13 ▲ 18 ▲ 20	300	▲ 12 ▲ 16
G2	250	21	▲ 5 ▲ 80 ▲ 89	2682	844	▲ 5 ▲ 7	426	▲ 13 ▲ 18 ▲ 20	311	▲ 12 ▲ 16
G3		20	▲ 5 ▲ 29 ▲ 35	2554	888	▲ 5 ▲ 7	482	▲ 13 ▲ 18 ▲ 20	348	▲ 12 ▲ 16

Tab. XXV - Resumo dos efeitos benéficos obtidos na vida da ferramenta e na redução das forças de corte.

6. CONCLUSÕES

- Consideráveis efeitos benéficos foram obtidos na vida da ferramenta, devido o aumento da percentagem de sulfetos de manganês, na composição do material: atingindo 220% na velocidade de 140 m/min, 230% em 181 m/min, 90% em 224 m/min e 35% em 250 m/min. Portanto, para $a = 2,0$ mm e $s = 0,25$ mm/rotação, a velocidade ideal de corte em termos de vida da ferramenta será da ordem de 180 m/min.

- As forças de corte diminuem com o aumento da percentagem de MnS, atingindo a redução máxima de 30% na força de avanço, para a velocidade de 140 m/min.

- A introdução de maior percentagem de manganês e enxofre, na composição do material não produz nenhuma alteração considerável na resistência à tração e dureza do material.

- As inclusões de sulfetos de manganês apresentam uma forma aproximadamente esférica e, não muda com a variação da percentagem de manganês e enxofre.

Pelo exposto, sugere-se os seguintes trabalhos:

- Determinar para o mesmo material e velocidades de corte, maior número de dados referentes a outros avanços, profundidade de corte e ângulos da ferramenta, procurando otimizar as condições de corte.

- Testar ferramentas com maior percentagem de TiC e TaC, e pastilhas de cerâmica, procurando relacionar os resultados com os obtidos neste trabalho.

- Pesquisar o efeito da temperatura da plataforma dinamométrica sobre o sinal das forças de corte.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Landolt-Börnstein - Zahlenwerte und Funktionen, Springer Verlag, 6ª Auflage, 2ª Band, 1963.
- (2) Chiaverini, V. - Aços e Ferros Fundidos, ABM, 4ª Edição, São Paulo, 1977.
- (3) Stahl Eisen Prüfblatt 1160-69 (dezembro de 1969).
- (4) Ferraresi, Dino - Fundamentos da Usinagem dos Metais, 1ª volume, Editora Edgar Blucher, São Paulo, 1970.
- (5) Rapatz, F. e Motolik, F. - Zerspanbarkeit der Werkstoffe, Werkstoff, Handbuch Stahl und Eisen, Verlag, Stahleisen M.B.H., 4ª verlag, Düsseldorf, 1965.
- (6) Möckli, P. - Schnittkraftmessungen beim Drehen und Bohren von Gubwerkstoffen, WT-Z. ind. Fertig.65 (1975) 725-732.
- (7) Parent Simonin, Simone - Mesure de L'usinabilité des Malleables, Fonderie 356, mai, 1976.
- (8) Patterson, W.; Opitz H. e Coppetti, P. - Beitrag zur Zerspanbarkeit von grauen Gußeisen, Giesserei techn. - wiss.beihefte, Heft 3, juli 1965.
- (9) Tönshoff, H. K. e Wornecke, G. - Über die Zerspanbarkeit von Stahl und Guseisen, UDI-Z 120(1978) nr.7 - april(I).
- (10) Queiroz, A.A. - Usinabilidade de Ferro Fundido Cinzento e Avaliação da Temperatura e Força de Corte como Sensor de Desgaste, Tese de Mestrado, UFSC, 1976.
- (11) Barrow, G. - Tool-Life Equations and Machining Economics, Division of Machine tool Engineering, Departament of Mechanical Engineering, UMIST.

- (12) Vieregge, G. - Facteurs de Coupe, B.D.T. n° 30, Usinabilité des fontes, octobre 1963.
- (13) Pfau, D., Werner, G. e Winkler, H.H. - Anleitung zur Verschleiß - Schnittzeit - Untersuchung beim Drehen, TH Aachen, dezembro de 1971.
- (14) Stahl - Eisen - Prüfblätter des Vereins Leutscher Eisenhüttenlente - Zerspankraftmessung im Drehversuch, Prüfblatt 1.168-69, 2.Ausgabe, dezember 1969.
- (15) Field, M. e Kahle, J. F. - Definition de L'usinabilité, B.D.T. n° 30, Usinabilité des Fontes, ocotobre 1963.
- (16) Heine, Hans, J. - Usinage au tour des Fontes Malleables, B.D.T. n° 29, Usinabilité des Fontes Malleables, janvier 1963.
- (17) Weber, G. - Recherches Comparatives sur L'Usinabilité des Fontes Malleables, B.D.T. n° 29, Usinabilité des Fontes Malleables, janvier 1963.
- (18) Braun, H., Möckli, P. - Tempergub, Schaffhausen, trabalho gentilmente cedido pelos autores.
- (19) Barrow, G. - Tool Life Equation and Machining Economics 12° I.M.T.D.R., 1971.
- (20) Perrot, C. M. e Robinson, P. M. - Mechanisms of Wear of Tungstein Carbide-Cobalt Tools, II Metal Cutting Applications, the journal of Australien Institute of Metals, vol. 19, n° 4, december 1974.
- (21) Opitz, H e König, W. - On the Wear of Cutting Tools, 7° I.M.T.D.R., 1966.
- (22) König, W. e Kreis, W. - Werkstoffkenngrößen und ihre Bedeutung für die Zerspanung, Z. Metallkde, Bd 66(1975) H.1.
- (23) Trent, E. M. - Cutting - tool Materials, Metallurgical Reviews - 127.
- (24) Stahl - Eisen Prüfblatt 1178-69.

- (25) Siepmann, H. - Gußeisen, Werkstoff-Handbuch Stahl und Eisen, Verlag Stahleisen M.D.H., Düsseldorf, 1965.
- (26) Pieske, A.; Chaves Filho, L.M. e Reimer, J.F. - Ferros Fundidos Cinzentos de Alta Qualidade, Sociedade Educacional Tupy, Joinville, 1974.
- (27) Wellinger; Gimemsner e Bodenstern - Werkstoff Tabellen der Metalle, 7ª Auflage, 1972.
- (28) Daeves, Karl - Werkstoff-Handbuch Stahl und Eisen, Verlag Stahleisen M.B.H., 4ª Auflage, Düsseldorf, 1965.
- (29) Branco, H.C.C. e Santos, A.B.S. - Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares, 1ª edição, I.P.T., São Paulo, 1977.
- (30) Batty, A.T. - Machinability of Cast Iron Surfaces, Castings, february 1970.
- (31) Erickson, P.S. e Hardy, J.M. - Effect of Manganese Sulfide Inclusions in Cast Gray Iron on tool Life, A.F.S. Transactions, volume 84, 1976.
- (32) Angus, H.T. - Physical and Engineering Properties of Cast Iron, B.D.T. nº 30, Usinabilité des Fontes, octobre 1963-
- (33) Field, Michael; Kahles, F. J. - Machining Characteristics of Cast Iron, A.F.S., Transactions, vol. 62, 1954.
- (34) Carden, R.L. e Lambe, A.D. - The Machining of Cast Iron BCIF Journal, november, 1965.
- (35) Field, M. - Relation of Microstructure to the Machinability of Wrought Steels and Cast Irons, Metcut Research Associates, Inc. Cincinnati, Ohio.
- (36) Weber, G. e Heine, H.J. - Bulletin de Documentation Technique, Usinabilité des Fontes Maleables nº 29, janvier 1963.
- (37) Ham, I.; Hitomi, K.; Thuring, G.L. - Machinability of Nodular Cast Irons, Part I tool Forces and Flank Adhesion, Transaction of the ASME 142, may 1961.

- (38) Pulvermetallurgische Werkstoffe
- (39) Weingaertner, W.L. - Usinagem a Quente de Aços Temperados. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis.
- (40) Silva Neto, E. - Relação Entre Propriedades e a Microestrutura de Materiais Bifásicos - Caracterização Específica Para os Ferros Fundidos Ferríticos Nodular e Cinzento. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis.
- (41) Ondracek, G. - Curso de Metalografia Quantitativa. UFSC, setembro de 1978.

APÊNDICE I

RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA METALOGRAFIA QUANTITATIVA

MATERIAL GRUPO	CORPO DE PROVA NUMERO	AREA DE SULFE- TOS Nº AMOSTRA (mm ²) *	AREA TOTAL DA AMOSTRA (mm ²) *	% EM VOLU- ME DE MS	Nº DE INCLUSÕES (N) DE MS	PERI- METRO (U) (mm) *	DIÁMETRO MÁXIMO DAS N INCLUSÕES Dmáx (mm) *	FATOR DE FORMA DAS N INCLUSÕES (F)	SUPERFICIE ESPECÍFICA Si (mm ⁻¹)
G1	800 A	450	39.811	1,13	21	372,1	124,0	16,6	642,2
	800 A	490	40.194	1,22	21	408,0	137,4	14,2	646,7
	800 A	323	40.153	0,80	14	262,3	83,6	11,0	630,7
	800 A	538	40.019	1,34	17	358,5	114,9	13,5	517,5
	800 C	533	40.519	1,32	14	331,0	106,7	10,9	482,3
	800 C	200	40.579	0,49	12	179,0	58,8	9,7	695,1
	800 C	256	40.866	0,63	9	111,0	37,6	13,5	336,8
	800 C	302	40.876	0,74	11	118,0	38,0	4,1	303,5
	800 E	336	40.434	0,83	18	285,0	94,8	14,5	658,8
	800 E	196	40.173	0,49	11	174,0	57,2	8,4	689,5
	800 E	508	40.906	1,24	21	368,0	128,1	13,6	562,5
	800 E	308	40.624	0,76	17	268,0	95,4	12,2	675,8
	800 H	554	41.176	1,34	18	387,0	129,1	13,9	542,6
	800 H	279	40.231	0,69	14	250,0	86,6	11,0	695,9
	800 H	617	39.879	1,59	21	418,0	149,7	16,5	526,2
	800 H	409	39.832	1,03	16	292,8	100,3	13,0	556,0
VALOR MEDIO		393,7	40.392	0,98	16	286,4	96,4	12,3	604,8
DESVIO PADRÃO		135,2	421,8	0,34	4	99,7	34,6	3,1	82,5

* para a obtenção dos valores reais, deverão ser divididos pela magnificação (610).

MATERIAL	CORPO DE PROVA	ÁREA DE SULFETOS NA AMOSTRA (mm ²) *	ÁREA TOTAL DA AMOSTRA (mm ²) *	% EM VOLUME DE MS	Nº DE INCLUSÕES (N) DE MS	PERÍMETRO (µ) *	DIÂMETRO MÁXIMO DAS N INCLUSÕES (mm) *	FATOP. DE FORMA DAS N INCLUSÕES (F)	SUPERFÍCIE ESPECÍFICA Si (mm ⁻¹)
C2	1107 A	242	41.104	0,59	13	223,0	78,3	10,7	715,7
	1107 A	176	41.325	0,43	8	151,0	54,0	6,3	666,4
	1107 A	243	41.097	0,59	16	217,0	73,9	13,2	693,6
	1107 A	315	40.485	0,78	15	254,0	88,6	12,8	626,3
	1107 C	269	40.732	0,66	10	190,0	68,0	8,7	548,6
	1107 C	187	40.898	0,46	12	172,0	60,7	8,9	714,4
	1107 C	385	40.881	0,94	13	264,0	89,0	10,1	532,6
	1107 C	284	41.146	0,69	15	231,0	81,4	11,1	631,7
	1107 E	154	40.915	0,38	12	183,0	65,9	8,8	922,9
	1107 E	207	40.304	0,51	12	209,0	76,6	8,2	784,2
	1107 E	269	41.096	0,65	13	214,0	76,2	10,7	617,9
	1107 E	229	40.819	0,56	13	214,0	76,3	10,1	725,8
	1107 H	244	41.058	0,59	14	228,0	83,3	12,2	725,8
	1107 H	162	40.861	0,40	11	144,0	53,7	7,5	690,4
	1107 H	232	41.037	0,56	8	160,0	59,0	6,3	535,6
	1107 H	183	40.872	0,45	14	198,0	69,1	11,0	840,3
VALOR MEDIO		236,3	40.914	0,58	12	203,3	72,1	7,8	685,8
DESVIO PADRÃO		60,6	253,7	0,15	2	34,8	11,3	2,1	106,8

* Para a obtenção dos valores reais, deverão ser divididos pela magnificação (610).

MATERIAL GRUPO	CORPO DE PROVA NÚMERO	AREA DE SULFE- TOS NA AMOSTRA (mm ²) *	AREA TOTAL DA AMOSTRA (mm ²) *	% EM VOLUME DE MS	Nº DE INCLUSÕES (N) DE MS	PEPINE- TRO (U) (mm) *	DIÂMETRO MÁXIMO DAS N INCLUSÕES Dmax (mm) *	FATOR DE FORMA DAS N INCLUSÕES (F)	SUPERFICIE ESPECÍFICA Si (mm ⁻¹)
G3	1900 A	26	40.139	0,06	3	34,0	12,0	2,6	1015,7
	1900 A	76	40.338	0,19	7	95,0	34,4	5,8	970,9
	1900 A	42	40.241	0,10	6	56,0	19,5	5,1	1035,6
	1900 A	67	39.702	0,17	6	78,0	25,2	5,0	904,2
	1900 C	57	41.323	0,14	5	63,0	19,7	4,0	858,4
	1900 C	90	41.248	0,22	9	102,0	35,3	6,8	880,2
	1900 C	57	40.869	0,14	5	71,0	24,1	3,5	967,4
	1900 C	66	40.417	0,16	8	91,0	35,0	6,5	1070,9
	1900 E	99	40.136	0,25	8	109,0	39,6	6,0	855,1
	1900 E	40	41.287	0,10	5	51,0	17,3	4,3	990,3
	1900 E	39	40.943	0,10	4	46,0	15,5	3,5	916,1
	1900 E	26	41.480	0,06	3	34,0	12,7	2,6	1015,7
	1900 H	37	40.922	0,09	3	42,0	14,4	2,1	881,6
	1900 H	53	40.308	0,13	5	63,0	20,1	4,3	923,2
	1900 H	52	40.530	0,13	5	67,0	23,6	4,1	1000,7
	1900 H	69	40.337	0,17	5	78,0	28,1	4,0	878,0
VALOR MEDIO	56	40.639	0,14	5	67,5	23,5	4,4	947,8	
DESVIO PADRÃO	21,2	521,7	0,05	2	23,4	8,8	1,4	69,1	

* Para a obtenção dos valores reais, deverão ser divididos pela magnificação (610).

APÊNDICE II

RESULTADOS EXPERIMENTAIS DOS ENSAIOS DE USINABILIDADE

MATERIAL: FMFP-3512, GRUPOS: G1, G2 e G3 - v = 140 m/min; s = 0,25 mm/rot; a = 2,0 mm; FERRAMENTA: NHA - K20														
MATERIAL GRUPO G1				MATERIAL DO GRUPO G2				MATERIAL DO GRUPO G3						
Nº DO C. P.	TEMPO DE USINAGEM T (min)	DESGASTE DE FLANCO		TEMPO DE USINAGEM T (min)	DESGASTE DE FLANCO		Nº DO C. P.	TEMPO DE USINAGEM T (min)	DESGASTE DE FLANCO		COMPONENTE DA FORÇA DE USIN. Fx = Fy = Fz = Fv (N) Fx (N) Fy (N) Fz (N)			
		VB (mm)	VBmáx (mm)		VB (mm)	VBmáx (mm)			VB (mm)	VBmáx (mm)				
1003	4	0,07	0,10	1105	4	0,10	0,11	1901	2	0,17	0,32	705	453	987
1003	8	0,12	0,18	1105	8	0,18	0,25	1901	4	0,22	0,34	716	460	1000
1003	12	0,16	0,22	1105	14	0,25	0,30	1901	6	0,27	0,42	711	460	998
1003	16	0,19	0,27	1105	18	0,28	0,31	1901	8	0,29	0,41	702	452	982
1004	20	0,20	0,27	1105	22	0,34	0,39	1901	10	0,31	0,47	705	452	978
1004	24	0,23	0,31	1106	26	0,36	0,45	1901	14	0,36	0,49	695	448	970
1004	28	0,27	0,32	1106	30	0,37	0,48	1901	18	0,34	0,46	702	455	968
1004	32	0,28	0,37	1106	34	0,40	0,49	1904	22	0,42	0,48	718	468	1001
1004	36	0,31	0,39	1106	36	0,42	0,49	1004	24	0,42	0,52	720	458	1005
1004	40	0,33	0,42	PARA OS ENSAIOS DE 4 a 8 min - ARESTA: 5B				1904	25	0,41	0,69	720	460	1000
1001	18	0,19	0,23	PARA OS ENSAIOS DE 14 a 36 min - ARESTA: 5A				1806	2	0,17	0,23	689	474	1005
1002	24	0,23	0,28					1806	4	0,23	0,33	690	473	1003
1002	28	0,25	0,32					1806	6	0,27	0,38	691	470	988
1002	32	0,28	0,33					1806	8	0,28	0,42	685	468	990
1002	36	0,31	0,37					1805	10	0,32	0,44	695	475	999
1002	40	0,32	0,38					1805	12	0,36	0,47	709	477	1004
1002	45	0,33	0,39					1805	14	0,40	0,57	716	481	1019
1002	50	0,34	0,41					1805	16	0,41	0,58	705	476	999
1002	50	0,34	0,41					1805	18	0,46	0,60	704	464	1000
PARA OS ENSAIOS DE 4 a 40 min - ARESTA: 5C														
PARA OS ENSAIOS DE 18 a 50 min - ARESTA 4H														
PARA OS ENSAIOS DE 2 a 25 min - ARESTA: 6D														
PARA OS ENSAIOS DE 2 a 18 min - ARESTA: 7A														

MATERIAL: FMPF-3512, GRUPOS: G1, G2 e G3 - v = 181 m/min; s = 0,25 mm/rot; a = 2,0 mm; FERRAMENTA NHA-K20																			
MATERIAL GRUPO G1						MATERIAL GRUPO G2						MATERIAL GRUPO G3							
Nº DO C. P.	TEMPO DE USI NAÇEM t (min)	DESGASTE DE FLANCO		COMPONENTE DA FOR CA DE COITE		Nº DO C. P.	TEMPO DE USI NAÇEM t (min)	DESGASTE DE FLANCO		COMPONENTE DA FOR CA DE COITE		Nº DO C. P.	TEMPO DE USI NAÇEM t (min)	DESGASTE DE FLANCO		COMPONENTE DA FOR CA DE COITE			
		VB (mm)	VBr _{máx} (mm)	Fx = Fy = Fz = Fv(N) Fz(N)	Fx = Fy = Fz = Fv(N) Fz(N)			VB (mm)	VBr _{máx} (mm)	Fx = Fy = Fz = Fv(N) Fz(N)	Fx = Fy = Fz = Fv(N) Fz(N)			VB (mm)	VBr _{máx} (mm)	Fx = Fy = Fz = Fv(N) Fz(N)	Fx = Fy = Fz = Fv(N) Fz(N)		
705	2	0,08	0,10	405	285	823	1301	6	0,20	0,33	546	374	906	1904	0,23	0,28	591	394	917
705	4	0,10	0,13	443	305	857	1301	8	0,29	0,45	547	367	907	1904	0,29	0,37	607	399	920
705	6	0,16	0,19	453	316	867	1301	10	0,31	0,48	556	374	916	1903	0,32	0,42	623	404	945
705	8	0,18	0,20	432	310	845	1301	16	0,34	0,54	562	382	915	1903	0,36	0,47	604	402	948
705	10	0,22	0,25	475	328	882	1205	19	0,39	0,42	543	372	935	1903	0,38	0,48	614	404	948
705	12	0,24	0,26	470	328	863	1206	29	0,43	0,50	565	383	935	1903	0,40	0,57	613	411	953
703	22	0,26	0,28	-	-	-	1206	35	0,45	0,52	577	383	942	1903	0,41	0,58	623	410	950
703	24	0,27	0,30	468	318	-	PARA OS ENSAIOS DE 6 a 35 min - ARESTA: 1A							1903	0,42	0,58	630	420	950
703	26	0,29	0,33	465	317	-								1903	0,43	0,58	638	413	953
703	28	0,31	0,34	474	316	-								1805	0,24	0,36	616	414	959
703	30	0,31	0,35	-	-	-								1805	0,28	0,37	600	406	938
703	32	0,31	0,35	-	-	-								1805	0,31	0,45	608	411	956
1005	34	0,32	0,38	487	350	873								1805	0,32	0,42	590	401	939
1005	36	0,35	0,40	500	357	885								1805	0,36	0,54	593	400	950
1005	38	0,36	0,41	500	360	885								1501	0,38	0,56	603	408	950
1005	40	0,37	0,46	500	350	880								1501	0,40	0,56	592	402	933
1005	42	0,39	0,46	483	350	880								1501	0,40	0,58	601	413	943
1005	44	0,40	0,47	483	357	880								1501	0,41	0,60	613	420	945
1005	46	0,41	0,49	493	347	880								1501	0,41	0,60	613	420	945

PARA OS ENSAIOS DE 2 a 18 min - ARESTA: 6E*

PARA OS ENSAIOS DE 2 a 18 min - ARESTA: 7B

MATERIAL: FMPF-3512, GRUPOS: G1, G2 e G3 - v = 224 m/min; s = 0,25 mm/rot; a = 2,0 mm; FERRAMENTA: NHA - K20																						
MATERIAL GRUPO G1						MATERIAL GRUPO G2						MATERIAL GRUPO G3										
Nº DO C. P.	TEMPO DE USI NAGEM T (min)	DESGASTE DE FLANCO		COMPONENTE DA FORÇA DE USIN.		Nº DO C. P.	TEMPO DE USI NAGEM T (min)	DESGASTE DE FLANCO		COMPONENTE DA FORÇA DE USIN.		Nº DO C. P.	TEMPO DE USI NAGEM T (min)	DESGASTE DE FLANCO		COMPONENTE DA FORÇA DE USIN.						
		VB (mm)	VBmáx (mm)	Fx (N)	Fy (N)			Fz (N)	Fs (N)	VB (mm)	VBmáx (mm)			Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fs (N)	VB (mm)	VBmáx (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
802	2	0,10	0,13	373	276	833	1304	0,16	0,26	448	308	865	1801	0,17	0,26	493	345	881				
802	4	0,13	0,17	360	271	824	1304	0,21	0,32	460	320	875	1801	0,21	0,28	498	345	875				
802	6	0,17	0,20	364	278	826	1304	0,26	0,47	463	332	870	1803	0,25	0,31	510	347	910				
802	10	0,24	0,25	397	303	851	1304	0,27	-	472	335	877	1803	0,26	0,33	509	361	905				
805	14	0,24	0,30	388	294	852	1304	0,35	-	489	343	880	1803	0,30	0,36	530	361	915				
805	18	0,26	0,36	408	306	874	1201	0,36	-	425	306	828	1803	0,32	0,41	511	370	896				
805	22	0,28	0,40	405	305	877	1201	0,38	0,49	485	340	920	1803	0,33	0,42	514	361	905				
805	26	0,30	0,42	400	313	863	1201	0,39	0,42	488	343	909	1803	0,36	0,43	525	375	920				
706	2	0,09	0,11	330	248	778	1201	0,42	0,45	484	334	910	1803	0,38	0,45	541	370	919				
706	3	0,11	0,14	344	254	798	PARA OS ENSAIOS DE 1 a 20 min - ARESTA: 1B					1806	0,41	0,47	533	370	936					
706	4	0,12	0,15	358	260	800						1503	0,16	0,25	500	350	884					
704	5	0,15	0,18	368	266	816						1503	0,20	0,26	518	358	900					
704	6	0,17	0,20	350	260	820						1503	0,27	0,37	528	363	888					
704	7	0,20	0,24	428	295	855						1503	0,30	0,40	540	363	904					
704	8	0,22	0,25	410	293	833						1503	0,32	0,42	538	358	892					
704	9	0,23	0,28	430	305	860						1503	0,33	0,46	560	378	912					
704	10	0,23	0,29	406	296	858						1503	0,42	0,67	570	383	937					
704	11	0,24	0,29	418	304	852						PARA OS ENSAIOS DE 2 a 18 min - ARESTA: 3A										
704	12	0,25	0,30	430	298	870						PARA OS ENSAIOS DE 2 a 16 min - ARESTA: 7C										
704	13	0,25	0,29	392	282	858																
804	16	0,27	0,31	391	313	834																
804	18	0,29	0,35	377	300	843																
804	20	0,30	0,37	390	310	850																
804	22	0,32	0,39	368	300	824																
804	23	0,32	0,40	390	330	870																
PARA OS ENSAIOS DE 2 a 26 min - ARESTA: 4G																						
PARA OS ENSAIOS DE 2 a 23 min - ARESTA: 3C																						

MATERIAL: FMPF-3512; GRUPOS: G1, G2 e G3 - v = 250 m/min; s = 0,25 mm/rot; a = 2,0 mm - FERRAMENTA: NHA - K20																				
MATERIAL GRUPO G1					MATERIAL DO GRUPO C2					MATERIAL DO GRUPO G3										
Nº DO C. P.	TEMPO DE USI NAGEM. T (min)	DESGASTE DE FLANCO		COMPONENTE DA FORÇA DE USIN.			Nº DO C. P.	TEMPO DE USI NAGEM. T (min)	DESGASTE DE FLANCO		COMPONENTE DA FORÇA DE USIN.									
		VB (mm)	VBmáx (mm)	Fx = Fy (N)	Fz = Fs (N)	Fx (N)			Fy (N)	Fz = Fs (N)	VB (mm)	VBmáx (mm)	Fx = Fy (N)	Fz = Fs (N)						
701	2	0,10	0,15	350	262	800	1102	2	0,20	0,26	398	287	813	1905	2	0,20	0,27	466	319	861
701	3	0,15	0,19	343	250	795	1102	4	0,27	0,33	402	302	822	1905	4	0,23	0,33	463	332	850
701	4	0,16	0,19	380	280	840	1102	6	0,30	0,33	405	298	827	1905	6	0,25	0,37	465	323	862
701	5	0,17	0,20	380	280	840	1102	8	0,30	0,39	410	302	828	1905	8	0,28	0,32	477	333	874
701	6	0,19	0,23	-	-	-	1102	10	0,33	0,40	422	298	825	1905	10	0,31	0,33	477	328	863
701	2	0,10	0,12	334	262	782	1102	12	0,33	0,40	435	300	832	1905	12	0,34	0,43	485	340	878
701	3	0,11	0,13	338	258	790	1102	14	0,34	0,40	422	322	847	1801	14	0,37	0,43	476	335	890
706	4	0,14	0,16	348	262	800	1104	16	0,37	0,41	432	310	845	1801	16	0,39	0,47	490	340	897
706	5	0,16	0,18	330	254	780	1104	18	0,41	0,44	432	317	835	1801	18	0,41	0,47	473	345	903
706	6	0,18	0,20	340	270	800	1201	2	0,21	-	353	272	757	1506	2	0,21	0,34	444	323	856
706	7	0,19	0,24	370	283	830	1204	6	0,26	-	416	291	859	1506	4	0,23	0,36	440	312	862
706	8	0,20	0,24	360	280	808	1204	8	0,27	-	411	299	855	1506	6	0,26	0,36	458	335	854
706	9	0,23	0,26	372	284	828	1204	10	0,31	0,41	419	304	860	1506	8	0,29	0,38	467	335	877
706	10	0,24	0,28	390	305	855	1204	14	0,37	0,42	413	300	847	1507	10	0,30	0,38	467	337	887
706	10	0,24	0,28	390	305	855	1204	16	0,40	0,46	422	308	864	1507	12	0,33	0,43	466	340	880
PARA OS ENSAIOS DE 2 a 6 min - ARESTA: 3A																				
PARA OS ENSAIOS DE 2 a 10 min - ARESTA: 3B																				
PARA OS ENSAIOS DE 2 a 18 min - ARESTA: 6F																				
PARA OS ENSAIOS DE 2 a 18 min - ARESTA: 7D																				