

INFLUÊNCIA DE FATORES METALÚRGICOS NA
USINABILIDADE DE FERROS FUNDIDOS.
FE 6002, FE 4212 E FC 35

01/83

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

INFLUÊNCIA DE FATORES METALÚRGICOS
NA USINABILIDADE DE FERROS FUNDIDOS
FE 6002, FE 4212 E FC 25.

Orientador:

Prof. Dr. NIVALDO LEMOS CUPINI

Orientado:

JAIR SILVEIRA

CAMPINAS - 1983

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Prof. Dr. NIVALDO LEMOS CUPINI, pela orientação, pela confiança, por tudo.

À U.F.Pb e à CAPES pelo apoio financeiro.

Aos Engenheiros HENRIQUE e RODOLFO LEIBHOLZ, Diretores da FEMAQ - Fundição e Engenharia de Máquinas Ltda., pelo fornecimento dos materiais ensaiados.

Aos Convênios Siderúrgica Nossa Senhora Aparecida - F.E.C. e FINEP/UNICAMP, e à Aços Villares, pelo fornecimento do ferramental necessário ao desenvolvimento do trabalho.

O autor deseja expressar ainda seus agradecimentos aos funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica e do Centro de Tecnologia da UNICAMP que de alguma forma colaboraram para o bom andamento e concretização deste trabalho.

INFLUÊNCIA DE FATORES METALÚRGICOS
NA USINABILIDADE DE FERROS FUNDIDOS FE 6002, FE 4212 E FC 25

R E S U M O

O presente trabalho trata da influência de dois materiais de molde (quartzo e granalha) e de dois tipos de modelo (convencional e poliestireno expandido) na usinabilidade dos ferros fundidos FE 6002, FE 4212 e FC 25, adotando-se como padrão o ferro fundido FC 20 processado por lingotamento contínuo. Os critérios utilizados nos ensaios de usinabilidade foram o do aumento progressivo da velocidade de corte no torneamento cilíndrico, e o do faceamento segundo Mathon, conforme norma AFNOR A03-654. O critério do aumento progressivo da velocidade de corte no torneamento cilíndrico foi também aplicado na superfície externa do fundido. São discutidos os resultados, os quais apresentaram variações significativas dos índices de usinabilidade dos metais ensaiados diante dos parâmetros do controle do processo de fundição acima mencionados.

INFLUENCE OF THE METALLURGICAL FACTORS IN MACHINABILITY
OF THE CAST IRON FE 6002, FE 4212 AND FC 25

ABSTRACT

The present work deals with the influence of mould material (sand casting and steel shot) and two types of pattern (conventional and expanded polystyrene) in the machinability of cast iron FE 6002, FE 4212 and FC 25. The cast iron FC 20 processed by continuous ingot casting was used as workpiece of reference. The "progressive increase of cutting speed in cylindrical turning" test and the "facing of Mathon" test were used as criteria in the machinability tests (AFNOR A03-654 standard test). The "progressive increase of cutting speed in cylindrical turning" criterion was also used for the external surface of the casting. Results are presented and discussed, and the machinability indices obtained showed the strong influence of the metallurgical parameters mentioned above.

ÍNDICE

Pág.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	1
------------------	---

CAPÍTULO 2

USINABILIDADE	3
2.1. CONCEITUAÇÃO	3
2.2. DIFUSÃO, INTERCAMBIALIDADE E EMPREGO DOS ENSAIOS DE USINABILIDADE	3
2.3. PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DA USINABILIDADE	7
2.3.1. Avarias e desgastes das ferramentas de corte.	7
2.3.2. Vida da ferramenta de corte	12
2.3.3. Forças de usinagem	12
2.3.4. Pressão específica de corte	15
2.3.5. Rugosidade superficial e tolerância dimensio- nal	16
2.3.6. Características do mecanismo de formação do cavaco	19
2.3.7. Temperatura de corte	25
2.3.8. Aspectos econômicos - Produtividade	27
2.4. ENSAIOS DE USINABILIDADE	29
2.4.1. Ensaios de longa duração	33
2.4.2. Ensaios de curta duração	33
2.4.2.1. Método do aumento progressivo da ve- locidade de corte no torneamento ci- lindrico	34
2.4.2.2. Método do faceamento de Brandsma e Mathon	36

CAPÍTULO 3

ALGUNS ASPECTOS RELACIONADOS COM FERRO FUNDIDO	39
3.1. INFLUÊNCIA DO MATERIAL DO MOLDE NA SOLIDIFICAÇÃO .	39
3.2. USINABILIDADE DOS FERROS FUNDIDOS - REVISÃO CRÍTICA	43
3.2.1. Caracterização dos ferros fundidos	43
3.2.2. Influência da composição química na usinabilidade dos ferros fundidos	45
3.2.3. Influência da microestrutura na usinabilidade dos ferros fundidos	48
3.2.4. Caracterização e usinabilidade dos ferros fundidos cinzento e nodular	52

CAPÍTULO 4

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	56
4.1. OS FERROS FUNDIDOS ENSAIADOS	56
4.1.1. Obtenção dos corpos de prova de ferros fundidos	56
4.1.2. Composição química	57
4.1.3. Análise micrográfica dos corpos de prova ...	57
4.1.4. Dureza Brinell dos corpos de prova	59
4.2. OS ENSAIOS DE USINABILIDADE	62
4.2.1. Procedimento dos ensaios de usinabilidade no método de torneamento cilíndrico	65
4.2.2. Procedimento dos ensaios de usinabilidade no método do torneamento de faceamento.	68

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
5.1. RESULTADOS OBTIDOS NO MÉTODO DO TORNEAMENTO CILÍN- DRICO	73
5.2. RESULTADOS OBTIDOS NO MÉTODO DO TORNEAMENTO DE FA- CEAMENTO	74
5.3. RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE OS DOIS CRITÉRIOS DE ENSAIOS ADOTADOS	76
5.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	77

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES	83
------------------	----

CAPÍTULO 7

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	84
BIBLIOGRAFIA	85
APÊNDICE I	91
APÊNDICE II	114
APÊNDICE III	129
APÊNDICE IV	140

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Grande parte das peças utilizadas industrialmente são fundidas com forma quase definitiva que necessitam na maioria dos casos de operações de usinagem. Desse modo, a estrutura bruta de fundição obtida durante o processo de solidificação, influencia necessariamente as propriedades que a peça vai apresentar em serviço, mesmo que esta venha a sofrer tratamentos térmicos posteriores [1].

Essa estrutura bruta de metais fundidos varia com a distância da parede do molde, podendo apresentar gradientes significativos das propriedades mecânicas e de composição química. Considerando esse fato, vários pesquisadores estudaram a influência destes gradientes na usinabilidade de ferros fundidos, em particular, no que se refere à sua superfície externa, a qual tem amplas razões para causar um considerável desgaste nas ferramentas de corte [2]. Hoff e Anderson estudaram as características da superfície externa em amostras de ferro fundido cinzento para vários materiais de molde [3]. M.A. El Salamoni analisou a influência do teor de umidade do molde na usinabilidade de vários ferros fundidos, comparando o comportamento da superfície externa com a região interna, concluindo que geralmente a usinabilidade apresenta índices mais baixos quando se usina a casca do fundido. Resultados semelhantes [4] também foram encontrados por Minorou e Harada quando analisaram a influência do material do molde e a posição deste, durante o vazamento de ferro fundido cinzento.

Até o presente, nenhuma pesquisa sistemática foi publicada, relacionada com a influência do modelo de poliestireno expandido na usinabilidade dos ferros fundidos. Alguns pesquisadores [5] aventam a hipótese de que a aplicação deste processo, na substituição de peças de estruturas soldadas, resulta não só em vantagens técnicas e econômicas, comparado com o processo convencional (fundição com modelo de madeira), como também resulta em melhor característica relativa a usinabilidade.

A indústria manufatureira, responsável pela transformação do material bruto em peças acabadas, por conformação com remo

ção de cavaco, está interessada em informações que levem a uma usinagem mais econômica. Esta exigência é válida, pois com o conhecimento das condições cada vez mais econômicas de corte, a operação pode ser realizada baseada em menor tempo e custo de fabricação.

São numerosos os fatores que têm 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 eficiente na descrição da usinabilidade.

O presente trabalho tem por objetivo comparar testes de usinabilidade em torneamento cilíndrico com torneamento de faceamento, como também estudar a influência do material do molde (areias e quartzo e granalha), do processo de modelação (modelos de poliestireno expandido e convencional) e da região ensaiada (interior e periferia) na usinabilidade dos ferros fundidos FE6002, FE4212 e FC25. Adota-se como critério a vida da ferramenta, determinada em ensaios de curta duração, baseados na norma AFNOR A03-654.

A pesquisa foi desenvolvida tendo-se usado como processos de usinagem, o torneamento de corpos de prova de forma cilíndrica, com aumento de velocidade discreta, e o faceamento nos mesmos corpos de prova com variação de velocidade contínua, mantidos constantes o avanço e profundidade de corte para cada critério de ensaio ($a=0,25$ mm/v e $P=2,5$ mm na operação de torneamento; $a=0,021$ mm/v e $P=1$ mm na operação de faceamento).

CAPÍTULO 2

USINABILIDADE

2.1 - CONCEITUAÇÃO

A usinabilidade pode ser definida como a capacidade que possui um metal de ser trabalhado com maior ou menor facilidade, através de ferramentas de corte sob determinadas condições de usinagem [8]. Essa grandeza tecnológica, é expressa por meio de um valor numérico comparativo (chamado índice de usinabilidade) que determina um conjunto de propriedades de usinagem do metal, em relação a outro tomado como padrão. Entende-se como propriedades de usinagem de um metal, àquelas que expressam o seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem, tais como: a vida da ferramenta, a força de corte, o acabamento superficial da peça, a temperatura de corte, a produtividade, e as características do cavaco. A literatura americana aponta os chamados índices comerciais de usinabilidade, onde o aço B1112 da AISI é tomado como padrão, ao qual é atribuído o índice 100 de usinabilidade. A rigor, qualquer material pode ser tomado como padrão [6].

A usinabilidade não é uma grandeza específica de um material, tal como a resistência à tração, o alongamento, a dureza, o módulo de elasticidade, etc.

2.2 - DIFUSÃO, INTERCAMBIABILIDADE E EMPREGO DOS ENSAIOS DE USINABILIDADE

Os primeiros estudos sobre usinabilidade foram publicados por Taylor em 1906 em ensaios de longa duração, onde a quantidade de material usinado era muito grande. Posteriormente muitos métodos foram propostos e testados com o objetivo de simplificar e reduzir o custo dos ensaios e aumentar as possibilidades do emprego dos testes pelas empresas [9]

O progresso alcançado durante toda essa década, ainda

não foi suficiente para definir com clareza, um índice, ou uma unidade bem definida à usinabilidade. M.K. Das e Tobias propõem um modelo matemático [7] em função dos parâmetros de ângulo de cisalhamento no corte ortogonal, para definir um índice universal de usinabilidade; com a restrição de que, a equação proposta é válida para operação de usinagem que resulte em cavaco contínuo. Também, Datsko [8] encontra uma equação para definir a usinabilidade em função da dureza Brinell, condutividade térmica e da área de redução na fratura do material, porém essa equação apresenta as seguintes limitações:

- a) o material da peça não deve ter qualquer temperatura de transição abaixo da temperatura do gume cortante da ferramenta. Caso isto ocorra, a usinabilidade calculada será menor do que a usinabilidade real do material;
- b) se o metal não pode ser fabricado livre de bolhas, a usinabilidade calculada será maior do que a usinabilidade real.

Atualmente, as informações disponíveis em sua grande maioria foram determinadas em função [9, 10, 11, 12, 13]: da vida da ferramenta, da forma de cavaco, do acabamento superficial da peça, das forças de corte e da temperatura. Estas grandezas dependem basicamente, dos aspectos metalúrgicos do par peça-ferramenta, da geometria da ferramenta e das condições de corte [6].

É importante salientar que, a forma da ferramenta nos vários processos de usinagem, conduz a diferentes formas geométricas de corte, tendo como consequência que, para cada processo de usinagem tais como: torneamento, furação, fresamento e outros, a rigor, deve ser feita a própria avaliação da usinabilidade, não existindo portanto uma correlação definida entre os vários critérios de ensaio de usinabilidade [13].

Com relação ao emprego de usinabilidade no Brasil, infelizmente não existe até o momento uma maior divulgação ou uso por parte das empresas nesse campo. A universidade começa a dar seus primeiros passos. Outros países já padronizaram alguns critérios de usinabilidade. Citaríamos como exemplo, a França que possui a norma experimental AFNOR A03-654, que trata de ensaios de longa e

curta duração. Os Estados Unidos, através da Sub-Comissão independente, para pesquisas de fluidos de corte da AISI elaborou tabelas de índices de usinabilidade, onde todos os metais são relacionados ao aço B1112, tomado como padrão [14]. Tais índices de usinabilidade foram elaborados em ensaios de torneamento e ferramenta de aço rápido. Os critérios destes ensaios até então mais utilizados foram o desgaste da ferramenta, acabamento superficial e produtividade. A utilização destes índices deve ser limitada, devido ao grande número de variáveis que os afetam (variáveis relativas ao material, processo de usinagem e critério empregado). Esses índices de usinabilidade devem ser entendidos como valores médios, devido a variações permitidas na composição química e fatores diversos que influem no processo de obtenção dos metais ensaiados, assim como erros experimentais (inevitáveis em qualquer método de avaliação). A dificuldade de se tomar o aço B1112 trefilado a frio como padrão universal é evidente, pois, se fosse padronizado no Brasil o uso desse aço, certamente vários fatores resultantes da operação de trefilação a frio que influem na usinabilidade (tais como: tamanho de grão cristalino, o quanto se deformou a frio, micro-estrutura, etc) iria apresentar valores diferentes para a usinabilidade comparado com o aço B1112 adotado pela AISI.

Além da tabela de usinabilidade referida acima, foi elaborada pela Sub-Comissão da AISI para usinagem das ligas de cobre uma tabela de usinabilidade das ligas de cobre, onde tomou-se como metal padrão, o latão de cobre livre [15].

A partir da década de 50, a Alemanha realizou várias pesquisas sobre usinabilidade, em ensaios de longa e curta duração [6] explorando de forma abundante os desgastes de ferramenta de corte.

O interesse pela pesquisa sobre usinabilidade tem aumentado nos últimos tempos. Como exemplo, cita-se o "Colégio Internacional para o estudo científico das técnicas de produção mecânica" (CIRP), que criou uma cooperativa internacional com o objetivo de investigar a correlação entre usinabilidade e características metalúrgicas dos aços com diferentes micro-estruturas [24]. A tabela I apresenta os países que participam desse estudo de usinabilidade e suas principais fontes de pesquisas.

Tópicos	Alemanha	Áustria	Bélgica	E.U.A.	França	Itália	Japão	Noruega	Holanda	Reino Unido	Suécia	Suiça
Rugosidade superficial				X	X			X	X		X	
Mecanismo e formação de corte	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X
Comportamento das ferramentas de aço rápido	X	X	X		X	X			X	X	X	
Comportamento das ferramentas de metal duro	X	X	X		X			X	X	X	X	
Plasticidade do aço submetido a esforço de corte				X	X					X	X	
Temperatura de corte				X	X	X			X	X	X	
Vibração e usinabilidade	X				X	X		X	X	X		
Propriedades metalúrgicas dos aços		X			X							
Programação estatística	X							X				
Unificação dos critérios	X			X	X						X	

TABELA I - Países que participam do estudo da usinabilidade, e suas principais fontes de pesquisa

2.3 - PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DA USINABILIDADE

Neste ítem serão apresentados e brevemente discutidos os parâmetros que permitem avaliar a usinabilidade dos metais.

2.3.1 - Avarias e Desgastes das Ferramentas de corte

Durante a operação de usinagem ocorrem desgastes nas superfícies de saída e de folga de ferramentas. Esses desgastes são desgastes convencionais. São medidos no plano de medida da ferramenta com as seguintes denominações:

I_1 - desgaste da superfície de folga ou incidência

C_p - profundidade de cratera

C_l - largura de cratera e

C_d - distância do centro de cratera à aresta de corte, medidos na superfície de saída da ferramenta e que dimensionam o desgaste conhecido por cratera.

Existem outros desgastes convencionais originados pelo desgaste da cunha cortante, dado pelas grandezas:

D_Y - deslocamento da aresta cortante, medido segundo a interseção da superfície de saída com o plano de medida.

D_α - deslocamento da aresta cortante, medido segundo a interseção da superfície de incidência com o plano de medida.

D_β - deslocamento da aresta cortante, medido segundo a bissetriz do ângulo de cunha.

V_Y - volume gasto na superfície de saída.

V_α - volume gasto na superfície de incidência.

A figura 1 ilustra esquematicamente os desgastes convencionais da ferramenta de corte. Nessa figura, I_1 representa o desgaste médio da superfície de incidência, e $I_{1(max)}$ o desgaste máximo que ocorre na referida superfície. A profundidade e a distância do centro da cratera à aresta principal de corte são represen

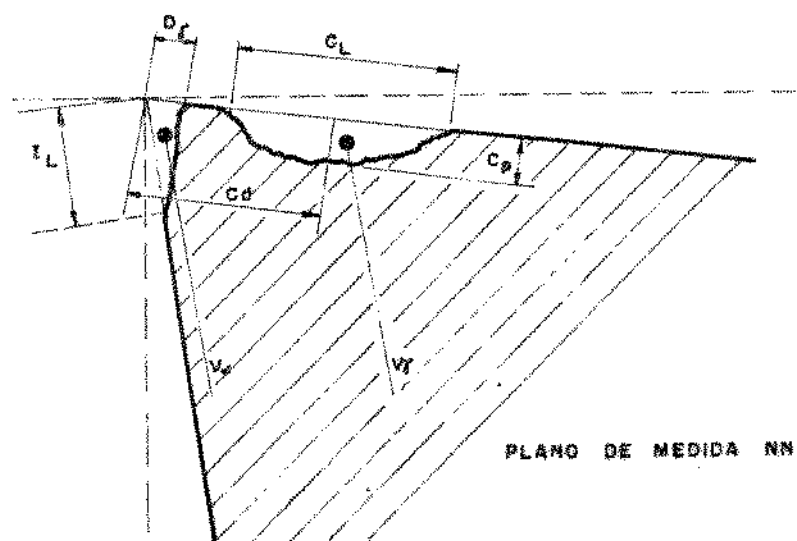
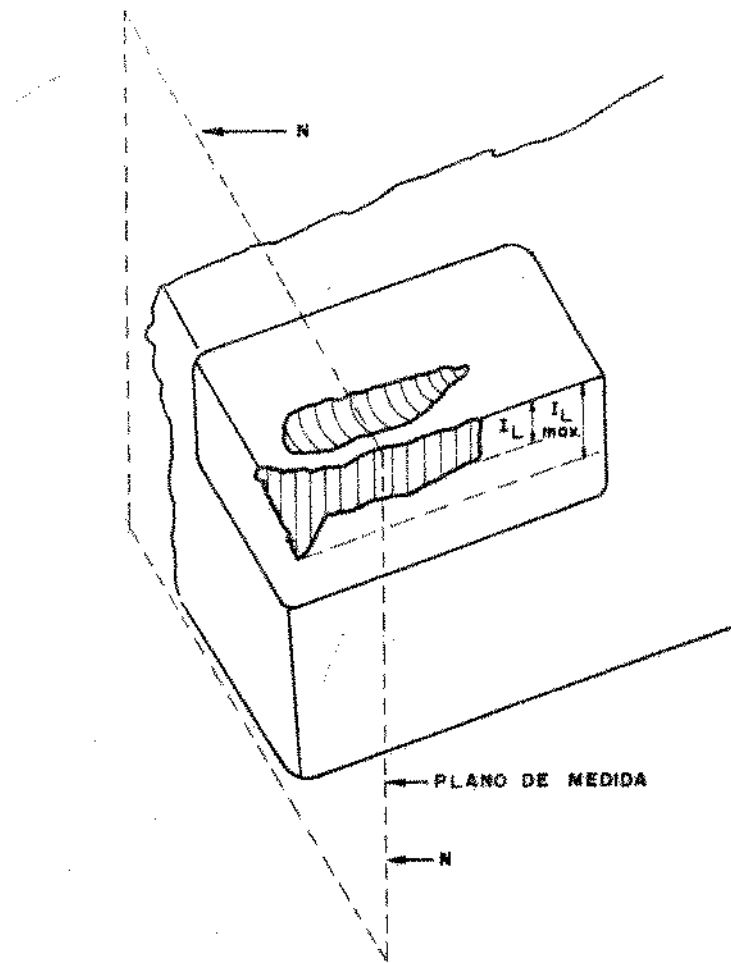


FIG. (1) LOCALIZAÇÃO DOS DEBASTES CONVENCIONAIS EM UMA FERRAMENTA DE TORNEAMENTO

tados por C_p e C_d respectivamente [6, 23].

O critério de fim de vida mais usado para o desgaste na superfície de incidência é $I_1 = 0,3$ a $0,4$ (mm) [18] em ensaios de usinabilidade. Ensaios com desgaste até $I_1 = 0,2$ (mm) são usados, mas sua confiabilidade é muito baixa. Estes valores não devem ser adotados no uso normal da ferramenta em operação de desbaste, pois nestas condições de desgaste, a usinagem ainda representa bom desempenho. Para estes casos adota-se $I_1 = 0,7$ a $0,8$ (mm) [19] em operação de torneamento.

Os valores admitidos para os desgastes da ferramenta 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.

Segundo diversos autores, os valores para os desgastes de incidência e cratera mais usados são:

$$I_1 = 0,38 \text{ mm} \quad \text{e} \quad I_{1(\text{max})} = 0,76 \text{ mm}$$

$$C_p = 0,004 + 0,3.a \quad \text{onde} \quad a = \text{avanço (mm/v)}$$

Outros pesquisadores [20], sugerem que o desgaste da superfície de incidência varia em função do tipo de usinagem:

$I_1 = 0,25$ a $0,38$ mm para operação de acabamento ou usinagem de precisão

$I_1 = 0,38$ a $0,75$ mm para operação de desbaste

$I_1 = 0,8$ a $1,20$ mm para operação de desbaste pesado.

A medição do desgaste da superfície de folga ou incidência (I_1) é facilmente obtida com microscópio de ferramentaria, com o uso de lupa ou, até mesmo, com um microscópio preso ao carro do torno (para não se retirar a ferramenta).

A medição das dimensões da cratera pode ser realizada de várias maneiras:

- a) Por estilete, acoplado a um transdutor de deslocamento de precisão, usado por Shaw, Smith e Cook;
- b) Oticamente, usando-se rugosímetros óticos;

c) Ópticamente, usando-se lente objetiva de alto poder de resolução axial.

Os desgastes de incidência e cratera permitem estabelecer um critério bastante preciso para prever a retirada da ferramenta de aço rápido e de metal duro da máquina [6]. A evolução desses desgastes estão representados esquematicamente na figura 2 [19].

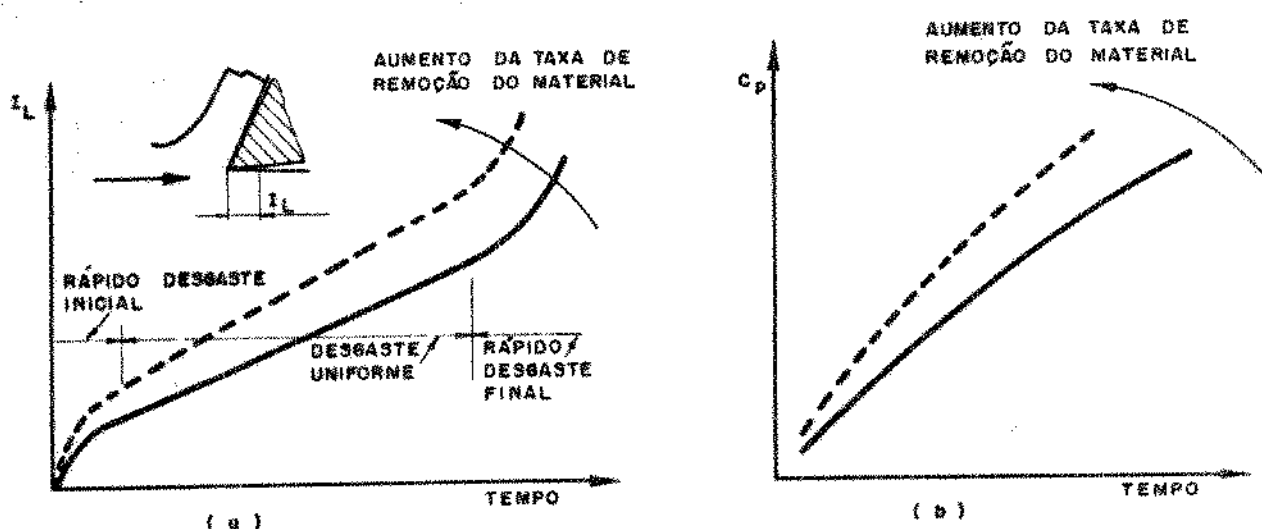


Fig.(2) Evolução esquemática do desgaste de incidência e de cratera, em função do tempo de usinagem e da taxa de remoção do material.

O desgaste de incidência (fig. 2a) em geral 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 mais intensidade [19].

A profundidade da cratera (fig. 2b) em geral, cresce proporcional ao aumento do tempo de usinagem. Ambos os desgastes crescem consideravelmente com o aumento da taxa de remoção do material (isto significa um aumento da velocidade de corte, avanço ou profundidade de corte, isoladamente, ou uma combinação desses parâmetros).

A destruição da aresta de corte em ferramentas de aço rápido na operação de desbaste se verifica em velocidades relativamente altas, as quais originam uma temperatura na aresta cortante, superior a 600°C . A rugosidade da superfície de saída da ferramenta, aumentando com o desgaste, concorre para que a aresta cortante atinja essa temperatura, e em consequência ocorre uma redução da dureza levando-se à destruição da ferramenta. O tempo em que esse fenômeno se processa é muito curto, e tal ocorrência é evidenciada de dois modos:

- Pela formação do anel brilhante na superfície de corte.
- Pelo aumento das componentes da força de avanço P_a e da força de profundidade P_p de usinagem [6].

O anel brilhante consiste na formação de uma superfície brilhante na peça, no instante em que a aresta cortante da ferramenta perde sua capacidade de corte; geralmente é acompanhada de um novo ruído na operação da usinagem (fig. 3).

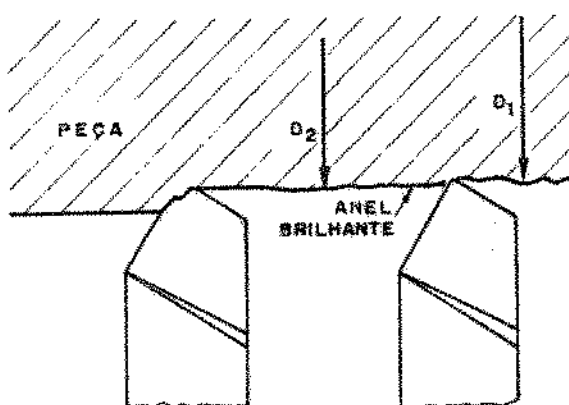


Fig. (3) Determinação da perda da capacidade de corte numa ferramenta de aço rápido pela formação do anel brilhante.

2.3.2 - Vida da ferramenta de corte

Chama-se vida de uma ferramenta, o tempo que a mesma trabalha efetivamente sem perder sua capacidade de corte, segundo um critério previamente estabelecido. Atingido esse tempo, a ferramenta deve ser reafiada ou substituída. Em outras palavras, a vida da ferramenta é o tempo entre duas afiações sucessivas necessárias, no qual, ela trabalha efetivamente (deduzido os tempos passivos) [6]. Como critério de vida pode ser usado: o tempo de corte, o volume de material usinado ou o número de peças fabricadas. O fim de vida, coincide, geralmente, com um avançado estado de desgaste nas superfícies que formam as arestas cortantes da ferramenta, e em geral, este fenômeno pode ser atribuído às seguintes causas [18]: desgaste na superfície de folga ou incidência, desgaste na superfície de saída (desgaste de cratera), deformação plástica da aresta cortante, e, desgaste térmico e mecânico da aresta de corte.

As duas últimas, geralmente levam a ferramenta ao colapso total, e, por esta razão, os desgastes da superfície de folga e cratera, são usados como critérios de fim de vida. Os principais responsáveis pelos citados desgastes são [18]: 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 [21].

O estudo da vida da ferramenta de corte conduz a obtenção das curvas de vida. Tais curvas são de grande importância para a determinação da velocidade econômica de corte, contribuindo de forma preponderante no estabelecimento do índice de usinabilidade do metal. A utilização do critério de vida da ferramenta é o critério que mais pesa na determinação do índice de usinabilidade.

Em alguns ensaios de usinabilidade de curta duração, o índice de usinabilidade é determinado pela vida da ferramenta de corte, em um tempo relativamente curto.

2.3.3 - Força de Usinagem

Denomina-se força de usinagem (P_u) a força total que atua sobre a cunha cortante da ferramenta durante a usinagem. É

obtida através da medida das suas componentes em três direções ortogonais por meio de dinamômetros especiais, colocados nas máquinas de ensaio. A figura 4 apresenta as direções das forças de usinagem para o processo de torneamento. Nessa figura, v representa a velocidade de corte, v_a a velocidade de avanço da ferramenta, e v_e a velocidade relativa.

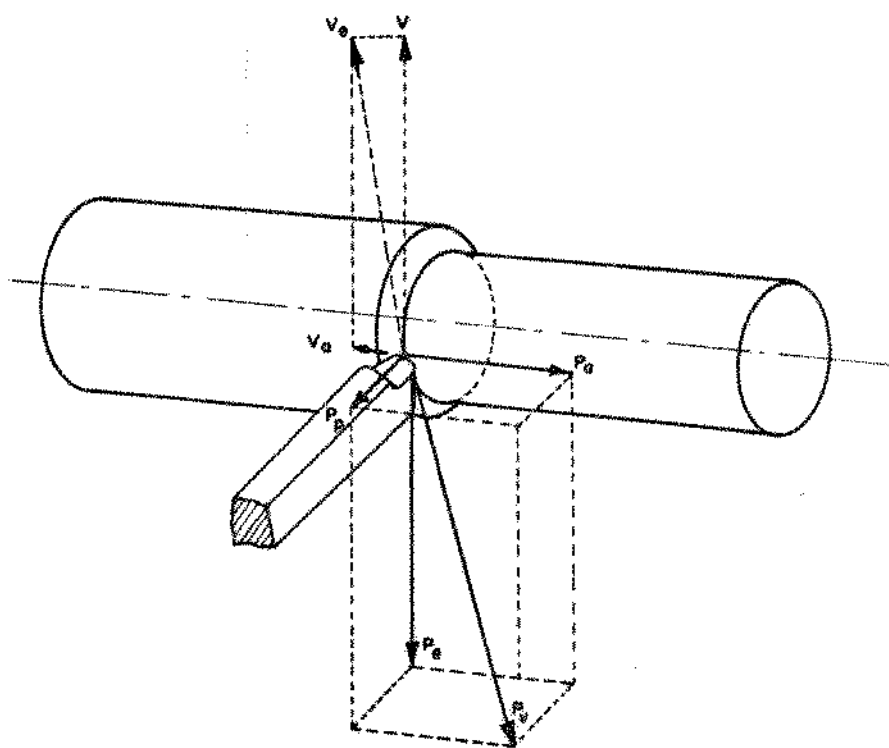


Fig. (4) Componentes da força de usinagem no torneamento.

Na determinação do índice de usinabilidade na operação de torneamento de um material, é suficiente o conhecimento da componente segundo a direção de corte (dado pela velocidade de corte), ou seja, a força de corte P_c . É esta força a principal responsável pela potência de usinagem. Na determinação do índice de usinabilidade na operação de furação com força de avanço constante, mede-se o torque e a força de avanço [35]. Nesse caso, o avanço varia com a irregularidade do material, com a vibração da fer-

ramenta, com a variação do atrito da broca com a peça e do atrito do cavaco com a broca e a peça. A forma de cavaco influi consideravelmente nos resultados, com exceção da furação em ferro fundido [6].

A força de usinagem pode ser tomada como critério de fim de vida (avaliando dessa forma o índice de usinabilidade de um metal) como cita Armarego [25]. Portanto é de se esperar que se constitua em um bom sensor de desgaste.

Já há vários anos uma equipe da Universidade de Turim chefiada por Micheletti tem estudado o comportamento da força de corte [26]. Algumas conclusões a que eles chegaram, foram:

- a) O desgaste por cratera e na superfície de incidência aumenta com a força de corte;
- b) A variação da força de corte com o tempo é função dos parâmetros de corte.

Queiroz [27] avaliou a força de corte como sensor de desgaste na usinabilidade do ferro fundido cinzento. Nesse trabalho, o autor conclui que a usinabilidade sob o ponto de vista da força de corte é muito sensível ao avanço e a profundidade. A sensibilidade devido a velocidade, apesar de ser razoável, é inversamente proporcional a força de corte. Isto pode ser atribuído ao fato de que a menores velocidades se tem maiores arestas pontiças de corte e conseqüentemente maiores forças. Em altas velocidades, há uma redução da resistência do material usinado, devido ao aumento da temperatura, com uma conseqüente redução da força de usinagem.

Schlensinger [6, 24], estudou pela primeira vez o critério de determinação da perda de capacidade de corte numa ferramenta de aço rápido através do aumento das componentes da força de avanço P_a e de profundidade de corte P_p (figura 5).

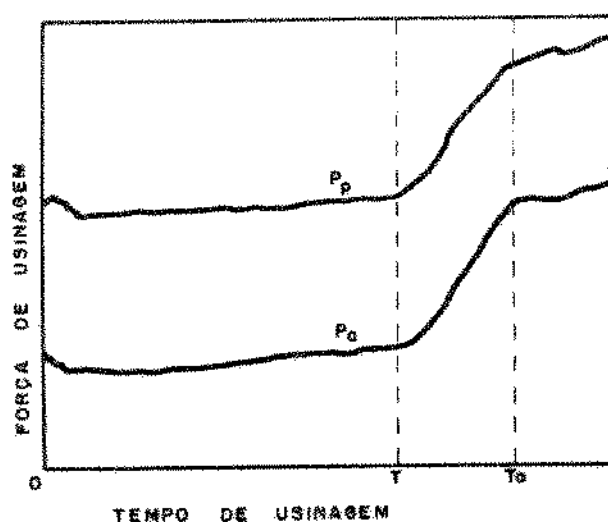


Fig.(5) Determinação da perda da capacidade de corte numa ferramenta de aço rápido devido ao aumento das forças de avanço e profundidade.

2.3.4 - Pressão específica de corte

Denomina-se pressão específica de corte a força de corte P_c por unidade de área de seção de corte:

$$K_s = \frac{P_c}{S}$$

onde:

P_c = força de corte

$S = p.a = b.h$ - área da seção de corte (p =profundidade de corte, a =avanço, b =comprimento de corte e h =espessura de corte)

Verificou-se experimentalmente [23] que a pressão específica de corte depende dos seguintes parâmetros: material da peça (composição química e resistência mecânica), área da seção de corte (o avanço tem maior influência do que a profundidade de cor

te), velocidade de corte (K_s diminui com o aumento de v), fluido de corte e rigidez da ferramenta.

Como medida relativa de usinabilidade, calcula-se através da pressão específica de corte, o volume de cavaco usinado por C.V. e por minuto $\text{cm}^3/\text{C.V. min}$.

Procurou-se pesquisar a pressão específica de corte não somente como um índice de usinabilidade, mas também como uma grandeza de medida do desgaste da ferramenta e conseqüentemente sua vida. Com exceção de alguns resultados particulares de usinagem com velocidades baixas, não se obteve nenhum resultado positivo. Verificou-se que materiais com a mesma pressão específica de corte, apresentavam composição química e características mecânicas diferentes.

2.3.5 - Rugosidade superficial e tolerância dimensional

Um parâmetro de importância na avaliação da usinabilidade dos metais é a rugosidade superficial da peça usinada. Verificou-se [14] experimentalmente que materiais manufaturados nas mesmas condições de usinagem com a mesma ferramenta e máquina operatriz, apresentam rugosidades superficiais diferentes. Logo, esta grandeza constitui uma propriedade de usinagem que contribui basicamente na avaliação do índice de usinabilidade. Para definí-la utilizam-se parâmetros e símbolos gráficos normalizados por diferentes países. O Brasil, Estados Unidos e Inglaterra utilizam a grandeza R_a (desvio médio quadrático), a Alemanha utiliza frequentemente a altura de rugosidade máxima R_t (representada por R_{max} pela ABNT). Com o intuito de se procurar uma relação entre essas grandezas, como também uma relação com o desvio médio quadrático R_q , foi realizado interessante trabalho [28].

A qualidade da superfície de uma peça é caracterizada pelo acabamento obtido na usinagem e pelas propriedades físicas e mecânicas do metal na camada superficial. Estas propriedades são modificadas durante a operação de usinagem devido, principalmente a ação dos seguintes fatores:

- Pressão da ferramenta contra a peça
- Atrito da superfície de incidência contra a peça

- Atrito interno do metal na região de deformação plástica
- Calor gerado no processo de corte
- Trepidação da ferramenta e da máquina
- Fenômenos específicos do processo de formação do cavaco
- Geometria da ferramenta
- Condições de usinagem (v e a principalmente)

Considerando-se a influência do material da peça, e fixando-se as outras variáveis enunciadas acima, a rugosidade superficial obtida poderá servir para classificar o metal, principalmente no que diz respeito do ponto de vista do acabamento superficial.

Uma relação que se poderia tomar como índice de usinabilidade comparativo do acabamento superficial é:

$$C_r = \frac{(R_{\max})_{\text{teor}}}{R_{\max}}$$

onde:

$(R_{\max})_{\text{teor}}$ é a rugosidade máxima obtida de: $(R_{\max}) = \frac{a^2}{8 \cdot r}$

(a = avanço e r = raio de curvatura da ponta da ferramenta)

R_{\max} é a rugosidade máxima obtida no ensaio

A equação apresentada não permite, porém, classificar plenamente o material, pois além de R_{\max} depender das características do rugosímetro (raio de curvatura da ponta do captador, princípio de medida, etc), o seu valor é insuficiente para definir de maneira completa o acabamento da superfície.

Nas ferramentas de aço rápido, os desgastes limitados pelas exigências das tolerâncias ou rugosidades das peças, originam uma vida da ferramenta muito curta. A figura 6 mostra a curva de variação do diâmetro da peça, na usinagem com aço rápido, segundo Schallbroc [6].

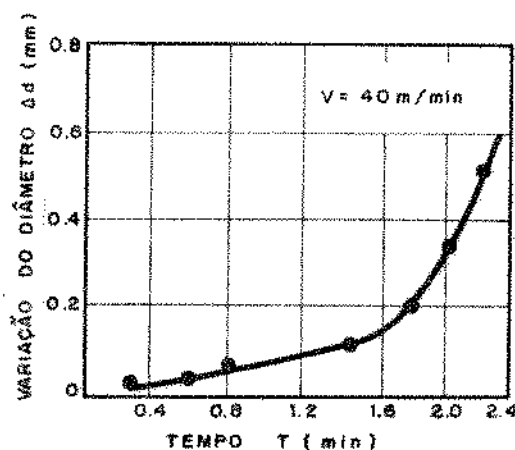


Fig. (6) Variação do diâmetro Δd de uma peça em função do tempo de usinagem, ferramenta de aço rápido.

Um material de maior resistência associado a uma maior velocidade de corte, permite a obtenção de peças com melhor acabamento superficial. Se o material é de pequena resistência ou a velocidade de corte é muito baixa, o material será arrancado durante a operação de usinagem e a peça apresentará em sua superfície uma série de microtrincas [20]. Na usinagem de ferro fundido em particular, forças de corte elevadas causam o deslocamento da grafita na superfície da peça, dando uma aparência porosa. Também a grafita no ferro tende a diminuir o brilho da sua superfície [22]. A figura 7 apresenta o resultado dessa afirmação.

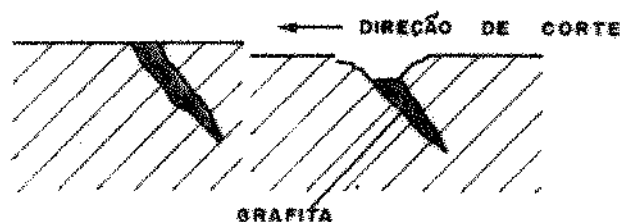


Fig.(7) Seção transversal de um ferro fundido, usinado com força de corte elevada. A grafita é arrancada causando uma cratera na superfície.

2.3.6 - Características do mecanismo de formação do cavaco

A compreensão do fenômeno de corte dos metais apresenta sérias dificuldades devido a sua extrema complexidade e aos inúmeros fatores que nele atuam. Sendo assim, para uma explicação científica das diferentes grandezas relacionadas com a usinagem dos metais, tais como: desgaste da ferramenta e suas causas, aresta postiça de corte, força de corte, etc, torna-se necessário um estudo minucioso do processo de formação do cavaco.

A importância do estudo experimental é evidente, pois a teoria da plasticidade não permite explicar satisfatoriamente os fenômenos observados. No processo de formação do cavaco, as velocidades e as deformações que ocorrem são muito grandes, principalmente se comparados com aquelas tratadas na teoria da plasticidade.

No mecanismo de formação do cavaco, com ferramenta de metal duro ou de aço rápido, para cada porção de material removido tem-se alternadamente uma fase de recalque e uma fase de escorregamento; ou seja, o fenômeno de formação do cavaco é periódico. Esta afirmação foi comprovada experimentalmente sob diversas formas [23].

Diversas classificações de cavaco têm sido propostas. As mais comuns apontadas pela literatura alemã e americana, consistem de três tipos [6]: cavaco contínuo, de cisalhamento e de ruptura.

O cavaco contínuo forma-se na usinagem de metais dúteis e homogêneos. Apresenta-se constituído de lamelas justapostas numa disposição contínua e agrupadas em grupos lamelares.

O cavaco de cisalhamento forma-se quando houver diminuição da resistência do material no plano de cisalhamento, devido ao aumento da deformação, ou a heterogeneidade da estrutura do material.

O cavaco de ruptura forma-se na usinagem de materiais frágeis, tais como, ferro fundido ou latão, com exceção do ferro fundido nodular, que, pela sua ductilidade, apresenta cavaco contínuo.

Além da classificação mencionada, os cavacos também se

caracterizam pela forma com que se apresentam. Segundo Vierrege [21] tem-se quatro formas de cavacos: cavaco em fita, cavaco helicoidal, cavaco espiral e em lascas ou pedaços.

Certas formas de cavaco dificultam a operação de usinagem, prejudicam o acabamento superficial da peça e influem no desgaste da ferramenta. Entre elas, a mais indesejável é a do cavaco em fita, que pode provocar acidentes, ocupar muito espaço, sendo de difícil transporte.

A forma de cavaco pode ser modificada pela alteração das condições de corte, dando-se uma geometria especial, ou executando-se os chamados quebra-cavacos na superfície de saída da ferramenta [19].

As características do cavaco permite avaliar o índice de usinabilidade dos metais através de vários parâmetros, tais como: grau de recalque, coeficiente volumétrico e forma do cavaco, frequência e amplitude de vibração da força de usinagem, e ângulo de cisalhamento. Esses parâmetros serão apresentados e brevemente discutidos.

a) Grau de recalque

Define-se grau de recalque R_c a relação entre a espessura do cavaco h' e a espessura de corte h :

$$R_c = \frac{h'}{h}$$

onde:

h' é obtido pela medida direta do cavaco, por meio de micrômetro com pontas finas ou esféricas.

h é obtido pelas condições de usinagem ($h=a.\text{sen}X$)

Vários pesquisadores [6, 11] procuraram estabelecer uma relação entre o grau de recalque e a usinabilidade dos metais. Verificou-se que, com um aumento considerável de R_c , a superfície da peça usinada piora, chegando a aparecer trincas superficiais devido ao arrancamento do cavaco da peça. Aumentando-se a velocidade de corte, para um determinado material, o grau de recalque R_c di-

minui, com uma conseqüente melhoria na qualidade da superfície da peça usinada.

Weber [6] constatou experimentalmente que, entre a formação do cavaco e o desgaste de cratera C_p existe certa relação, a qual é de certa forma evidenciada pelo grau de recalque e pela tensão de cisalhamento do cavaco. A comparação entre as grandezas características do cavaco e o desgaste de cratera foi verificada no aço ABNT 1060 com diferentes tratamentos térmicos. No estado recozido do material, o cavaco é altamente deformado, a superfície de contato cavaco-ferramenta é grande, a pressão média de contato é pequena e a velocidade de saída do cavaco V_c é pequena também. Já no estado normalizado e principalmente no revenido, tem-se um comportamento inverso ao anterior.

b) Coeficiente volumétrico e forma do cavaco

Define-se coeficiente volumétrico do cavaco w a relação entre o volume ocupado pelo cavaco V_c e o volume correspondente ao seu peso V_p :

$$w = \frac{V_c}{V_p} = \frac{V_c \cdot \rho}{P \cdot 1000}$$

onde:

P = peso do cavaco (kg)

ρ = peso específico do material usinado (g/cm^3)

O cavaco em fita além de apresentar o maior coeficiente volumétrico, é difícil de ser transportado e pode provocar acidentes. Logo, a forma de cavaco, e conseqüentemente o volume ocupado pelo mesmo, pode contribuir na escolha do material a ser usinado, contribuindo portanto no índice de usinabilidade do material.

Para se ter uma idéia comparativa dos diferentes materiais, a tabela II apresenta os valores dos coeficientes volumétricos w segundo Schallbroch [6].

MATERIAL	w	γ°	v(m/min)
Liga Al p/máquinas automáticas	3,4	0	100
Ferro fundido	6,3	12	30
Liga Al p/ êmbolo	8,3	25	100
Al-Cu-Mg	24,2	25	100
Al-Mg-Si fundido	40,0	25	100
Al-Mg	85,0	25	100
Al-Cu-Ni	132,0	25	100
Aço Liga VCN 35	295,0	12	30
Al puro	1000,0	25	100

TABELA II - Coeficiente volumétrico w de diferentes materiais.

c) Frequência e amplitude de vibração da força de usinagem

Enfatizando o que já foi enunciado, o mecanismo de formação do cavaco, nas condições normais de usinagem com ferramentas de aço rápido e metal duro, é um fenômeno periódico.

As figuras 8.a e 8.b apresentam os gráficos da frequência e da amplitude de variação da força de usinagem, segundo ensaios realizados por Ferraresi [6]. Foi constatado que o acabamento da superfície da peça melhora com o aumento da frequência de formação do cavaco. Verifica-se ainda que esta frequência aumenta com a velocidade de corte e com a diminuição do avanço, propriedades estas que contribuem para a melhoria do acabamento da peça.

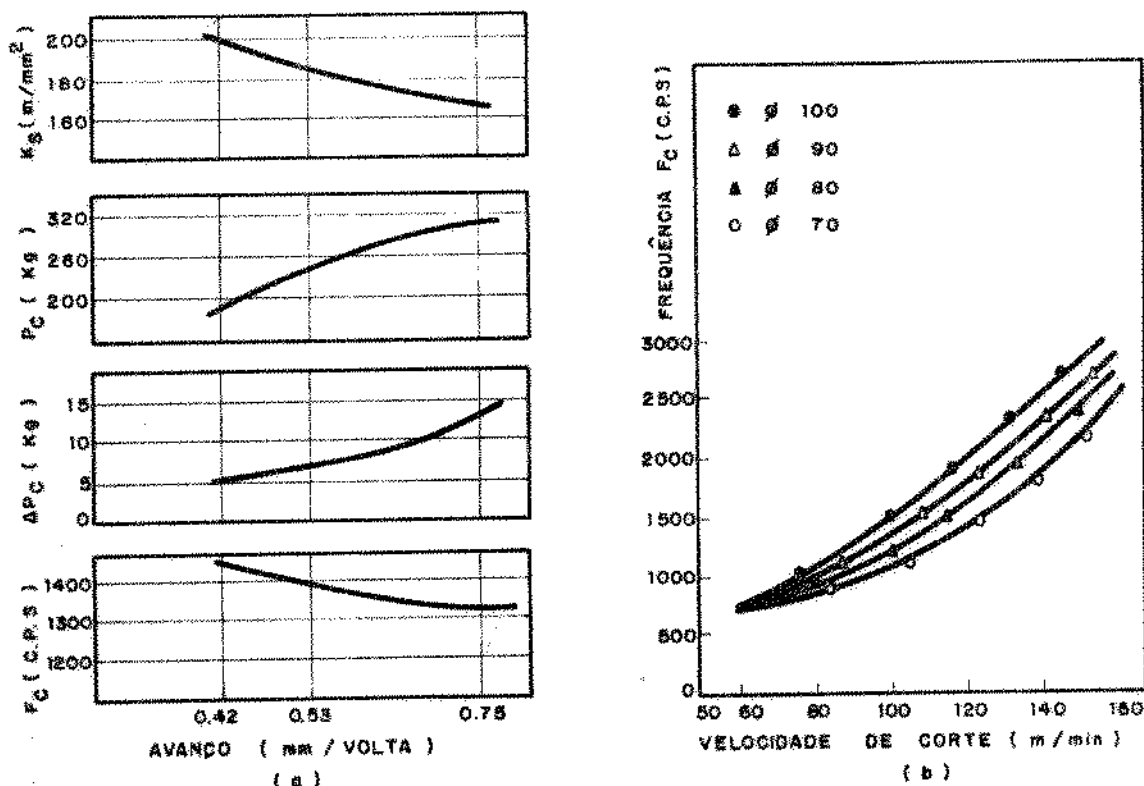


Fig. (8) a) Influência do avanço sobre a força de corte P_C , a pressão específica de corte K_s , a amplitude ΔP_C , e a frequência da variação da força de corte f_C . b) Frequência da formação do cavaco em função da velocidade de corte, para diferentes diâmetros da peça.

d) ângulo de cisalhamento

Vários pesquisadores [7, 11, 24] têm procurado estabelecer relações práticas entre o ângulo de cisalhamento ϕ e certos parâmetros característicos da usinagem dos metais. Para se ter uma idéia de como este assunto foi explorado, citaremos algumas das teorias mais importantes já desenvolvidas. Teorias de: Ernst e Merchant; Lee e Shaffer; Shaw Cook e Finnie; Hucks; Kobayashi e Thomsen; Hill; Pug; Oxley e Welsh; Colding, Usui, Kikuchi e Hoshi.

O ângulo de cisalhamento é formado entre o plano de cisalhamento e o plano de corte. Na realidade, não se tem um pla-

no de cisalhamento, mas sim uma região de cisalhamento, a qual pode-se sempre tomar um plano de base (imaginário) para se realizar os estudos dos diagramas de forças e velocidades.

Grande parte das teorias citadas são baseadas em considerações teóricas e ensaios práticos, que fornece valores de ϕ bastante próximos da realidade. Dentre estas, a teoria de Kobayashi e Thomsen contém parâmetros que descrevem as características de usinabilidade dos metais. Porém, em alguns casos os valores calculados de ϕ se afastam dos valores fornecidos pelos ensaios.

Sharam [11] estudou a influência de vários elementos de liga na usinabilidade de ferros fundidos, através dos ensaios de formação do cavaco (grau de recalque) e do ângulo de cisalhamento ($\phi = \text{artg}(\cos\gamma / (R_c - \text{sen}\gamma))$). Os resultados apresentaram boa correlação entre si.

Em recente trabalho [7] Tobias E. Das propõem um índice universal de usinabilidade (D) em função do ângulo de cisalhamento (ϕ), do ângulo de atrito (ρ) e do ângulo de saída do cavaco (γ), cuja expressão é:

$$D = \frac{\cos(\rho - \gamma)}{\cos(\rho - \gamma + \phi)}$$

onde:

D é uma constante física que relaciona as propriedades do material com sua usinabilidade, que também é uma propriedade do material usinado.

A grande vantagem da expressão proposta por Tobias, é que a mesma foi formulada através de experiências práticas. Também, a maioria das teorias citadas não consideram uma constante relativa ao material usinado.

A figura 9 apresenta um gráfico que relaciona a força de corte P_c e a força de cisalhamento P_z com a área do plano de cisalhamento S_z , para um aço de corte fácil. É proposto que este gráfico seja um gráfico universal de usinabilidade para o material em apreço.

A limitação da equação proposta é que, a mesma só é válida para operação de usinagem que resulte em cavaco contínuo.

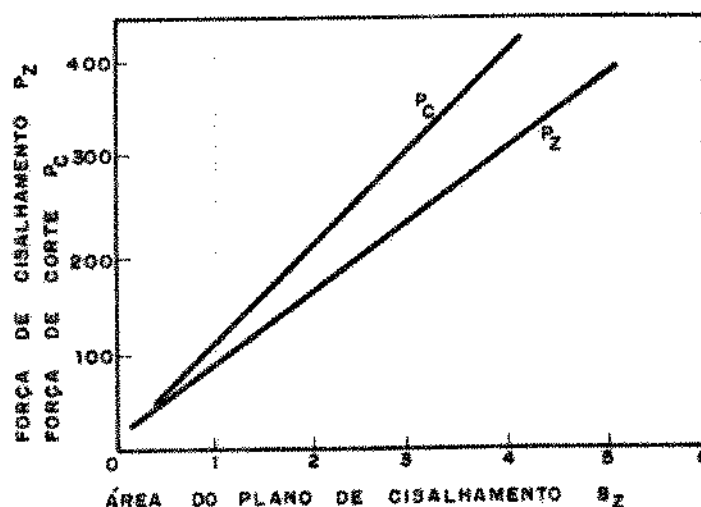


Fig. (9) Gráfico universal de usinabilidade.

2.3.7 - Temperatura de corte

A temperatura de corte, além de representar uma grandeza de medida da sollicitação térmica da ferramenta, pode ser empregada em alguns casos para avaliar a usinabilidade do material, uma vez que este parâmetro tem estreita relação com a vida e o mecanismo de desgaste das ferramentas.

As várias técnicas para a medição da temperatura de corte são: técnica dos termopares, irradiação térmica e vernizes térmicos. Dentre estes, a técnica dos termopares embutidos é o mais preciso, porém sua instalação é relativamente dispendiosa. A técnica do termopar peça-ferramenta foi muito utilizado [19]; nesse caso, a temperatura obtida pode ser considerada como a temperatura média da superfície de contato ferramenta-cavaco (região onde se encontra as maiores temperaturas).

Nas ferramentas de aço rápido, a perda da capacidade de corte é devido ao efeito da temperatura de corte, o qual determina a destruição da aresta cortante (formação do anel brilhante). Nas ferramentas de metal duro o desgaste desempenha papel preponderante, o qual aumenta progressivamente, chegando a valores que pode originar a quebra do gume cortante. A determinação do índice de usinabilidade baseado no ensaio da temperatura de corte tem aplicação somente quando existe uma relação significativa entre a temperatura de corte e a vida da ferramenta.

Trabalhando-se com ferramentas de aço rápido, em baixas velocidades de corte, verifica-se uma dependência biunívoca entre a temperatura de corte t e a vida da ferramenta T . Representando em papel dilogarítmico a curva $T = f(t)$, obtém-se uma reta cuja equação é:

$$t \cdot T^{1/m} = C$$

onde:

C e m dependem do material da peça e da ferramenta

Segundo Schallbroch e Reichel [6], os valores das constantes C e m , para usinagem com aço rápido (com $v < 70$ m/min), praticamente independem da área da seção de corte. Esta propriedade permite determinar, com pequeno número de ensaios, as curvas TXv do par ferramenta-peça, para diferentes áreas da seção de corte, uma vez conhecida a curva TXt e a curva de vida TXv para uma determinada condição de usinagem. Para o trabalho com ferramenta de metal duro, a correspondência entre a vida da ferramenta e a temperatura de corte não é tão perfeita como no aço-rápido.

Takeyama [29] analisou o mecanismo do desgaste na superfície de incidência, concluindo, também, que este pode ser classificado em dois tipos: um independente da temperatura de corte em velocidades baixas (temperaturas baixas também), outro para velocidades altas, onde o desgaste é sensivelmente afetado pela temperatura, como mostra a figura 10. Os materiais utilizados foram aço liga G18B e ferro fundido FC30, usando ferramentas P10 e K20 (ISO). A figura 10 apresenta o resultado dos ensaios com o aço.

Completando seu trabalho, Takeyama levantou curvas de vida em função da temperatura tomando como critério de vida $l_1 = 0,6$ mm. A figura 10.b mostra o resultado obtido para o aço ensaiado.

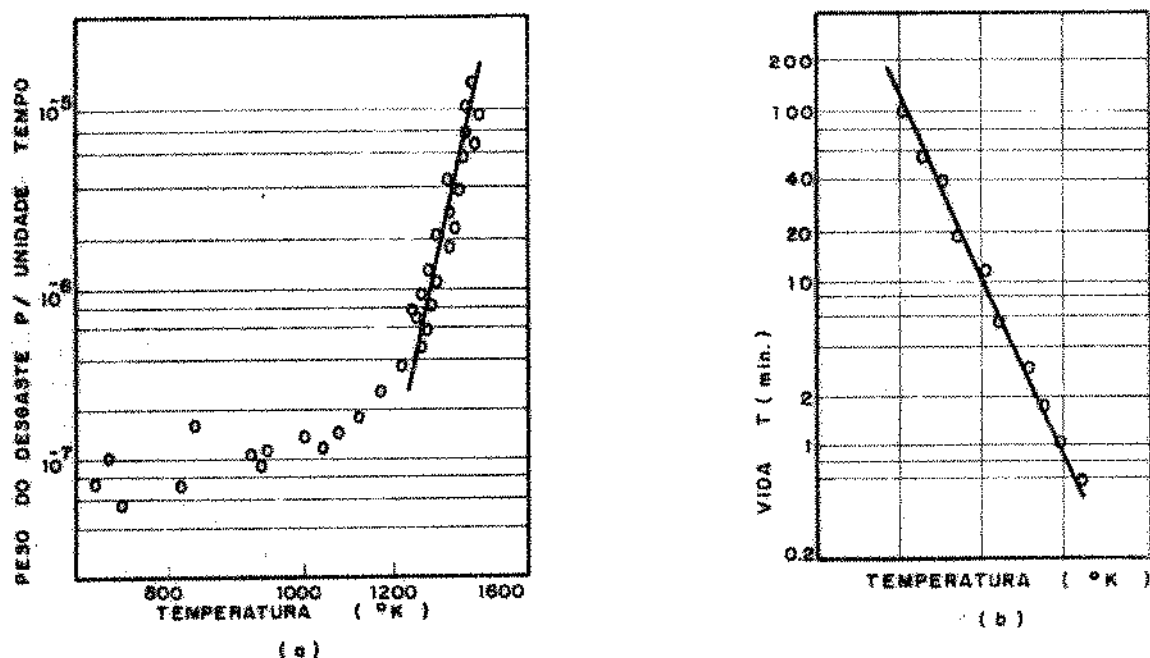


Fig. (10) a) Relação entre a temperatura e a taxa de desgaste na superfície de incidência.
b) Curva vida - temperatura, por Takeyama (29).

Queiroz [27] avaliou a temperatura como sensor de desgaste na usinabilidade do ferro fundido cinzento, concluindo que, a usinabilidade sob o ponto de vista da temperatura era muito sensível à velocidade de corte, e também tinha certa sensibilidade ao avanço, mas que a variável profundidade tinha influência desprezível.

2.3.8 - Aspectos econômicos: produtividade

Na determinação do índice de usinabilidade do metal, considerando-se o aspecto econômico, é necessário contar com dois

fatores: o acabamento superficial e a produtividade.

Segundo a Bethlehem Steel Co. [14], denomina-se índice de produtividade de um metal a relação entre a produção horária possibilitada por esse metal e a correspondente produção de um outro material tomado como padrão, tomando-se como parâmetros a vida média da ferramenta e uma equivalência aproximada do acabamento superficial nas peças produzidas. Como o acabamento superficial das peças deve ser idênticos, conclui-se que não é necessariamente importante para a comparação dos índices de produtividade, que as condições de usinagem do material ensaiado sejam as mesmas do material padrão. Portanto, é permitida uma flexibilidade na escolha da ferramenta, afiação, etc; enquanto que nos ensaios de curta duração é necessário uma perfeita concordância de detalhes nas condições de operação.

Para exemplificar a obtenção do índice de usinabilidade [14], consideremos a usinagem de dois tipos de aços A e B, no qual B é adotado como padrão. Inicialmente estes aços são usinados para uma vida de 8 horas, com velocidade de corte e de avanço conhecidas, resultando uma determinada rugosidade superficial para cada tipo. Verificou-se numa primeira tentativa, que as peças confeccionadas com o aço A não deram uma rugosidade superficial equivalente às peças do aço B. Foram feitas outras tentativas até se encontrar uma condição de usinagem tal (velocidade de corte e avanço), que permitisse obter para a vida média de 8 horas o mesmo acabamento superficial. Nessas condições, o aço A proporcionou uma produção de 447 peças/hora, enquanto que, para o aço B a produção foi de 377 peças/hora. Logo, em termos de produtividade de usinagem, o aço A pode ser considerado como tendo um índice de usinabilidade 119% em relação ao aço B ($447/377=0,119.100=119$).

É importante salientar, que, mesmo sendo possível usar ambos os aços em condições idênticas, eles não apresentaram o mesmo índice de usinabilidade em virtude da diferença de acabamento superficial.

Generalizando o exemplo anterior, foram analisados 10 tipos de aços e comparados os resultados com os índices comerciais de usinabilidade, normalmente aceitos pelos americanos. Os resultados obtidos apresentaram-se bastante coerentes, sem mostrar discordância, inversão ou deslocamentos.

Em alguns aços, o índice de usinabilidade obtido através da velocidade de corte V_{60} é aproximadamente igual à raiz quadrada do índice de produtividade:

$$I.U = \frac{V_{60}^E}{V_{60}^P} = \sqrt{\frac{N_E}{N_P}}$$

onde:

V_{60}^E : velocidade de corte para o metal ensaiado

V_{60}^P : velocidade de corte para o metal padrão

N_E : produção horária do metal ensaiado

N_P : produção horária do metal padrão

A tabela III ilustra os conceitos básicos de usinabilidade em termos de: vida da ferramenta, formação do cavaco, rugosidade superficial e outras variáveis diretamente relacionada com o comportamento de usinagem dos metais, tais como: força de usinagem, temperatura de corte, mecanismo de formação do cavaco, tolerância dimensional, etc. Os fatores que afetam indiretamente a usinabilidade também é apresentado. Apreciando essa figura, conclui-se que a usinagem não está relacionada com um único parâmetro, porém com muitas variáveis, as quais apresentam diferentes influências.

2.4 - ENSAIOS DE USINABILIDADE

Os fabricantes dos metais e de ferramentas, bem como seus consumidores tem enorme interesse em conhecer a usinabilidade de um metal devido a sua grande influência na produtividade de uma empresa, razão pela qual inúmeros métodos de ensaios de usinabilidade tem sido propostos por diferentes pesquisadores para julgar o comportamento do material, numa combinação peça-ferramenta, em relação às grandezas características de usinagem, tais como: desgaste da ferramenta, acabamento superficial, volume de material usinado, etc. Os métodos de ensaio que determinam a usinabi-

Conceitos básicos	Fatores que afetam a usinabilidade		Fatores que afetam a usinabilidade indiretamente
	Detalhes	diretamente	
Remoção de cavaco	{ Potência requerida Quebra do cavaco }	Mecanismo de corte	Material da peça e da ferramenta de corte
Vida da ferramenta	{ Desgaste de incidência e de cratera }	Força de corte	{ Microestrutura, propriedades mecânicas. Propriedades físicas e químicas, tratamento térmico. }
	{ Precisão Rugosidade superficial Tolerância dimensional }	Temperatura de corte	
Acabamento superficial		Condições de usinagem	{ Velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, fluido de corte, corte contínuo ou descontínuo (vibração). }
		Máquina-ferramenta	Tipo, potência, rigidez
		Ferramenta	Geometria, ajustagem

Tabela III - Parâmetros de avaliação da usinabilidade.

lidade de um metal trazem informações valiosas, quer no controle de qualidade de uma metalúrgica, quer na inspeção de recebimento pelo comprador, em um tempo não muito longo e com relativa precisão.

Os critérios de avaliação da usinabilidade de um material, são critérios baseados em:

a) Vida da ferramenta - Curvas de Vida (Métodos: comprimento usinado, faceamento de Brandsma e Mathon, aumento progressivo da velocidade de corte, sangramento com ferramenta bedame, radioativo).

b) Força de usinagem (Métodos: pressão específica de corte, tensão de cisalhamento, força de avanço constante).

c) Acabamento Superficial

d) Produtividade

e) Análise dimensional

f) Temperatura de corte

g) Características do cavaco (grau de recalque, coeficiente volumétrico e forma do cavaco, frequência e amplitude de variação da força de usinagem).

O parâmetro de avaliação da usinabilidade usado no presente trabalho é a vida da ferramenta.

A vida da ferramenta é o fator mais importante, pois esta governa as condições econômicas na operação de usinagem. O tempo gasto na operação de afiação ou troca da ferramenta e o próprio custo da mesma, incidem enormemente nos custos e produção de usinagem.

Ao se realizar os ensaios de usinabilidade, conforme se tem a evolução do desgaste da ferramenta, a superfície de corte apresenta um acabamento superficial pior, a força de usinagem aumenta com conseqüente elevação da temperatura na região em que se forma o cavaco, e o controle das dimensões da peça torna-se menos preciso.

Vários métodos indiretos para a avaliação da usinabilidade foram propostos. O método indireto considera a usinabilidade

em função de uma ou mais propriedades metalúrgica ou físico-química dos materiais ensaiados. Para a usinagem do aço carbono com aço rápido, foi elaborado por Wallich [24] uma relação inversa entre a velocidade de corte V_{60} e a resistência à ruptura. Ao invés da resistência à ruptura do material, pode-se empregar a dureza Brinell, segundo Janitzky [24]. Entretanto nem sempre pode-se afirmar que a usinabilidade é inversamente proporcional a dureza Brinell ou resistência a ruptura, como exemplo, cita-se o caso dos aços liga [6]. O limite de escoamento também foi empregado para este fim.

Para o caso dos ferros fundidos, a literatura [10, 17] aponta uma boa relação entre a microestrutura e a usinabilidade.

Czaplicki [39] procurou obter diretamente a velocidade de corte V_{60} dos aços carbonos em função da percentagem de C, Si, Mn, P e S do material trabalhado, encontrando um erro de $+ 8,6\%$ com relação aos ensaios de longa duração com ferramenta de aço rápido.

Para a determinação da usinabilidade de vários metais, é recomendável o emprego de mais de um critério de ensaio, não existindo uma correlação definida entre vários critérios. A figura 11 apresenta os resultados de ensaios usando como critérios, a temperatura, força e velocidade de corte V_{60} , segundo Czaplicki [39].

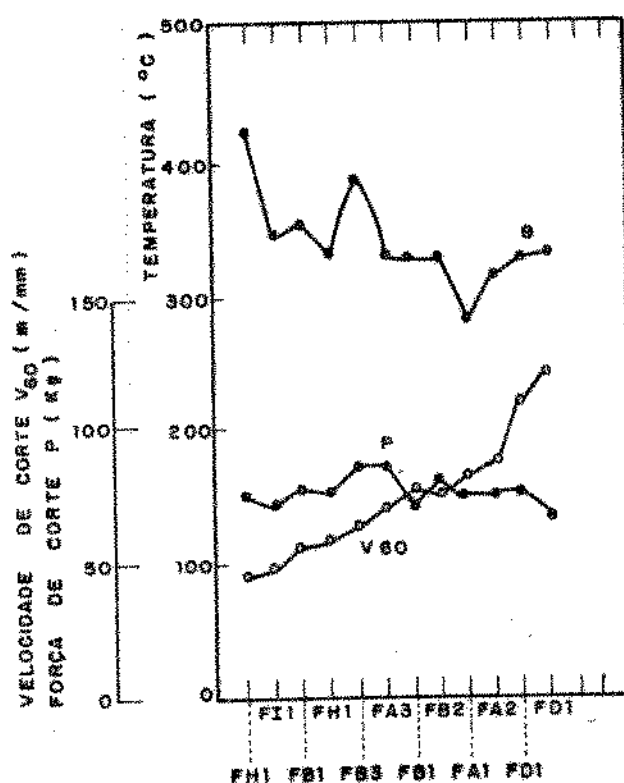


Fig. (11) Comparação de diferentes métodos de avaliação da usinabilidade.

2.4.1 - Ensaaios de longa duração

Os ensaios de longa duração são realizados com o objetivo de levantar curvas de vida de uma ferramenta e fatores que influem na sua forma, e assim, analisar as melhores condições econômicas de usinagem. A representação da curva de vida é feita em papel dilogarítmico da função $T = f(V)$, de acordo com a fórmula de Taylor $T.V^x = K$, onde x é o coeficiente angular da reta TXV , e a constante K pode ser interpretada como a vida da ferramenta para uma velocidade de corte 1 m/min.

Esse tipo de ensaio tem como desvantagem o elevado consumo de material e um tempo relativamente longo para sua execução. Geralmente os ensaios são realizados em condições normais de usinagem, onde o desgaste é verificado periodicamente até a dimensão previamente definida como fim de vida da ferramenta.

2.4.2 - Ensaaios de curta duração

Os ensaios de curta duração são realizados em condições normais ou em condições forçadas de usinagem [6]. Neste último caso, o ensaio consiste de usinagem em altas velocidades de corte onde o desgaste é preponderantemente por difusão; o tempo de vida da ferramenta é reduzido, e o volume de material usinado também. Esta é a grande vantagem deste método de ensaio, principalmente quando se trata de avaliar a usinabilidade relativa de vários materiais, com a mesma ferramenta de corte [35].

Nos ensaios de curta duração em que as ferramentas são utilizadas até sua destruição (queima), utiliza-se ferramentas de aço rápido.

Com relação a confiabilidade desses ensaios, foi publicado em 1963 [6] um interessante trabalho no qual participaram várias escolas de engenharia e instituições da Alemanha Ocidental. Nesse trabalho, é feita a comparação estatística dos resultados de ensaio de curta duração, baseados no desgaste da ferramenta com o correspondente ensaio de longa duração (V_{60}). Como grandeza comparativa, foi utilizada a determinação "D", dada por:

$$D = \frac{[\sum (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})]^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}$$

onde:

x_i = velocidade de corte determinada nos ensaios de curta duração, em condições de usinagem especificadas.

y_i = velocidade de corte V_{60} determinada nos ensaios de longa duração, nas mesmas condições de corte.

\bar{x} e \bar{y} = médias aritméticas dos valores x_i e y_i

Quando a função $y = f(x)$ for linear, $D=1$ (maior grau de correlação) e quando não há nenhuma relação definida entre x e y , $D = 0$.

Dos resultados obtidos, verificou-se que, no método do aumento progressivo da velocidade de corte, $D = 0,807$, e no método do comprimento usinado, $D = 0,923$. Desses exemplos, nota-se que existe um grau de correlação aceitável entre os ensaios de curta duração com ferramenta de aço rápido e os ensaios de longa duração.

2.4.2.1 - Método do aumento progressivo da velocidade de corte no torneamento cilíndrico

Neste método de ensaio de usinabilidade, a velocidade de corte v pode variar contínua ou discretamente. No primeiro caso, o aumento de v é conseguido em um torno de variação contínua de velocidade.

No método do aumento discreto, a velocidade é incrementada em progressão geométrica de razão 1,12 após cada comprimento de corte usinado de 25 mm, até destruir a aresta cortante da ferramenta em um tempo relativamente curto.

O ensaio é realizado num corpo de prova como mostra a figura 12, onde o comprimento de cada anel é calculado pela expressão:

$$L_{a0} = \frac{25 \cdot 10^3 \cdot a}{\pi \cdot (D_0 - 2p)} \quad [\text{mm}]$$

onde:

a = avanço [mm/volta]

p = profundidade de corte [mm]

D_0 = diâmetro nominal do corpo de prova [mm]

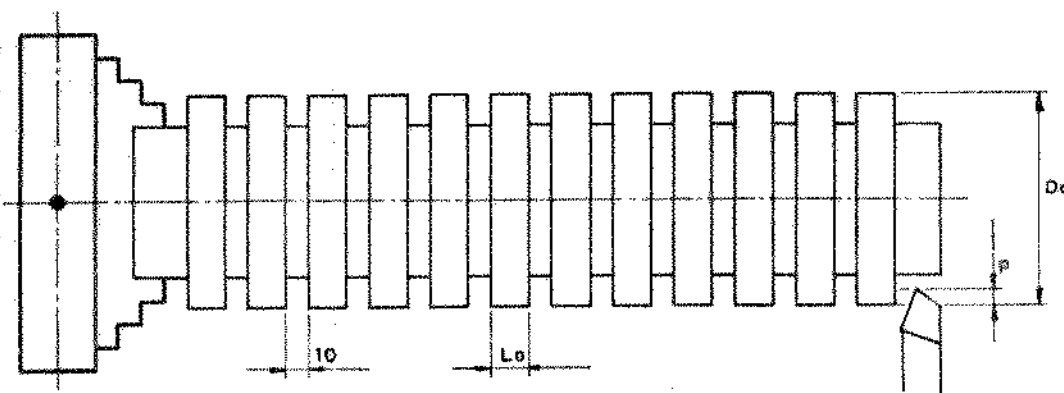


Fig. (12) Corpo de prova para os ensaios de usinabilidade.

A velocidade de corte inicial v_0 é selecionada de modo que a destruição da aresta de corte da ferramenta ocorra no 6º, 7º ou 8º anel (a finalidade dessa exigência, é que o ensaio seja realizado com um número considerável de mudança de rotação do tor no).

Após a queima da ferramenta, a velocidade de corte comparativa que constitui o resultado do ensaio é calculada pela expressão:

$$v_{\text{comp.}} = v_{n-1} + (v_n - v_{n-1}) L_a / L_{a0}$$

onde:

- v_{n-1} : velocidade de corte do anel usinado anterior ao anel que provocou a queima da aresta cortante da ferramenta.
- v_n : velocidade de corte onde ocorreu a queima da ferramenta.
- L_{a0} : comprimento de cada anel
- L_a : comprimento do anel usinado onde ocorreu a queima da ferramenta

O índice de usinabilidade de cada material é dado pela relação da velocidade comparativa do material ensaiado, com a velocidade comparativa do material padrão:

$$I.U. = \frac{v_{ce}}{v_{cp}} \cdot 100 \quad \begin{array}{l} \text{(material ensaiado)} \\ \text{(material padrão)} \end{array}$$

As características geométricas da ferramenta de aço rápido usada nesse ensaio, são as seguintes:

ângulo de folga	$\alpha = 8^{\circ}$
ângulo de saída	$\gamma = 25^{\circ}$
ângulo de posição	$\chi = 75^{\circ}$
ângulo de inclinação	$\lambda = 0^{\circ}$
ângulo de ponta	$\epsilon = 90^{\circ}$
raio de ponta	$R = 0,8 \text{ mm}$

Este método de ensaio é utilizado com maior frequência na Itália e Alemanha [24].

2.4.2.2 - Método de faceamento de Brandsma e Mathon

Este método consiste em facear um disco com rotação e avanço constantes, do centro para a periferia. Inicia-se com uma velocidade pequena, correspondente ao diâmetro do furo do disco, e chega-se a uma velocidade bem maior, definida pelo aparecimento da queima da aresta de corte [36]. Desta forma, a peça de ensaio deveria ter um diâmetro relativamente grande, para permitir a destruição da ferramenta numa única operação de faceamento.

Com o objetivo de reduzir o tamanho do corpo de prova e garantir uma medida do desgaste da ferramenta numa única operação de faceamento, Renaut Mathon [31, 36] inseriu ao teste de Brandsma algumas adaptações:

- O ensaio é realizado a partir de um furo central de 6mm, uma profundidade de corte de 1mm, com rotação e avanço constantes.

- A usinagem é interrompida com a queima da ferramenta. Após o ensaio, o perfil usinado do corpo de prova é medido com o auxílio de um relógio comparador acoplado ao próprio carro do tor no, com graduação de 0,01mm. Uma leitura no relógio comparador de 0,2mm corresponde a um recuo da ponta da ferramenta também de

0,2mm, definindo assim, um diâmetro $D_{0,2}$ do disco que indicará a medida de usinabilidade do material. A figura 13 apresenta esquematicamente a geometria do corpo de prova e da ferramenta usados no ensaio.

- Fazendo-se variar a velocidade de rotação do torno, com avanço constante, os valores de $D_{0,2}$ são plotados num diagrama $\log(D_{0,2}) = f(\log N)$, determinando uma reta, que indica:

$$D_{0,2} \cdot N^m = \text{constante}$$

onde:

m = inclinação da reta (varia de acordo com o material)
[12, 13]

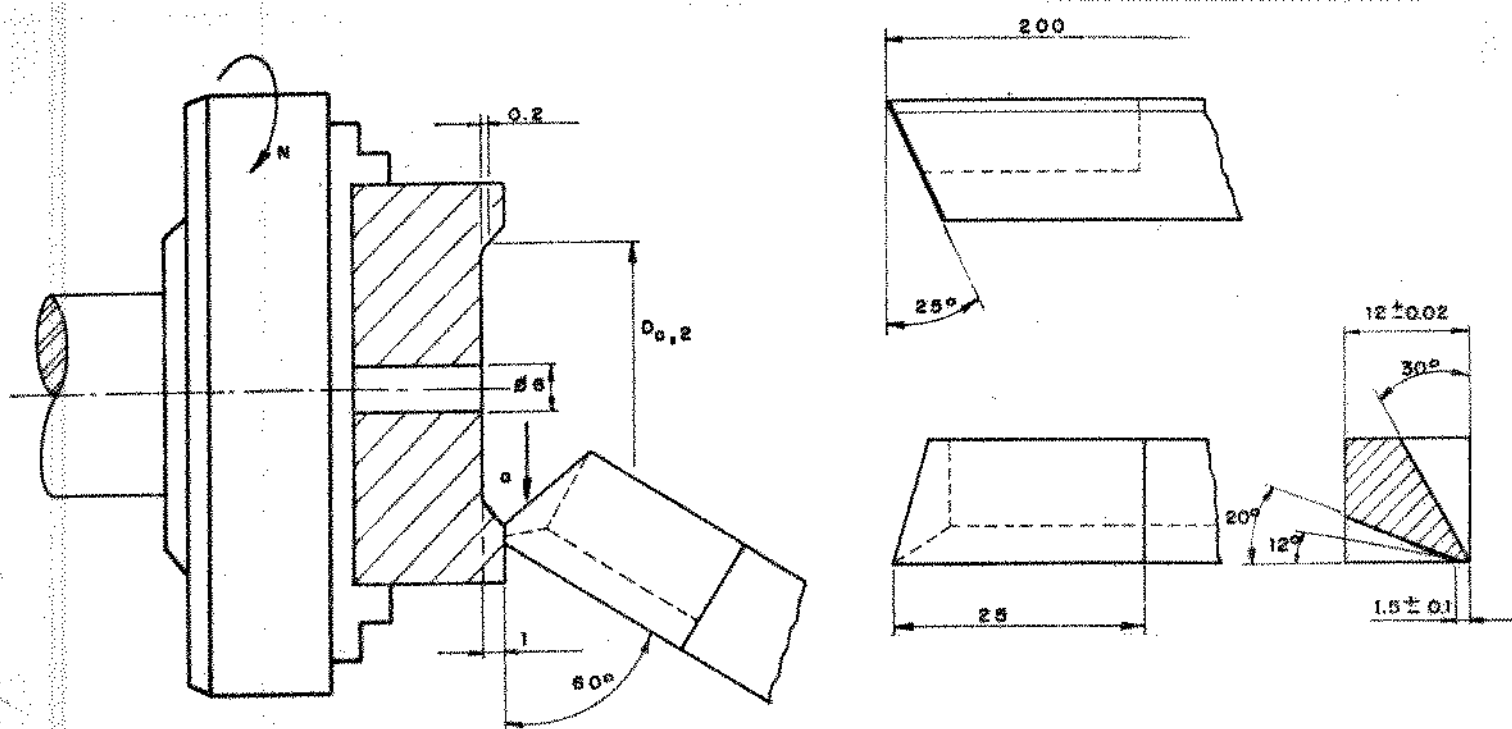


Fig. (13) Representação esquemática do método de faceamento de Mathon e a respectiva geometria da ferramenta.

O índice de usinabilidade de cada material é dado pela relação do diâmetro $D_{0,2}$ do material ensaiado, com o diâmetro $D_{0,2}$ do material padrão:

$$I.U. = \frac{D_{0,2}}{D_{0,2}} \cdot 100 \quad \begin{matrix} \text{(material ensaiado)} \\ \text{(material padrão)} \end{matrix}$$

Este método de ensaio tem sido utilizado na França. O corpo de prova é de fácil execução e não exige equipamento especial de medição.

Os dois métodos de ensaio descritos anteriormente estão padronizados pela norma francesa AFNOR A03-654 [36].

CAPÍTULO 3

ALGUNS ASPECTOS RELACIONADOS COM FERRO FUNDIDO

3.1 - INFLUÊNCIA DO MATERIAL DO MOLDE NA SOLIDIFICAÇÃO

A qualidade metalúrgica de um metal solidificado, depende basicamente do grau de instabilidade termodinâmica da interface de crescimento sólido-líquido. Esta instabilidade é determinada pela intensidade do super-resfriamento constitucional, que ocorre durante a solidificação, gerada pela existência de uma região enriquecida de soluto rejeitado adiante da interface sólido-líquido [37].

Como a composição química de uma liga tem um valor nominal fixo [38], somente os parâmetros determinados pelas condições de extração de calor do molde, como a velocidade de solidificação e o gradiente térmico da interface sólido-líquido, poderão ser variados, determinando as características estruturais do metal. Considerando-se que a estrutura de fundição está correlacionada com as propriedades mecânicas, físicas e químicas de uma peça, conclui-se que é importante, do ponto de vista tecnológico, que se possa prever a velocidade de solidificação e o gradiente térmico, em função de parâmetros que controlam a extração de calor do molde. A figura 14 apresenta as relações entre as variáveis que permitem o controle do processo de solidificação.

Um ferro fundido de determinada composição pode resultar usinável e com resistência mecânica elevada quando resfriado em condições normais em molde de areia, ao passo que apresentará elevada dureza, não podendo ser usinado caso seja resfriado rapidamente [38].

A figura 15 apresenta os modos essenciais de transferência de calor para um dado instante do processo de solidificação em um sistema metal-molde. A cada um destes modos de transferência de calor, existe, associado, uma resistência térmica que se opõe ao fluxo de calor, determinando a intensidade de extração

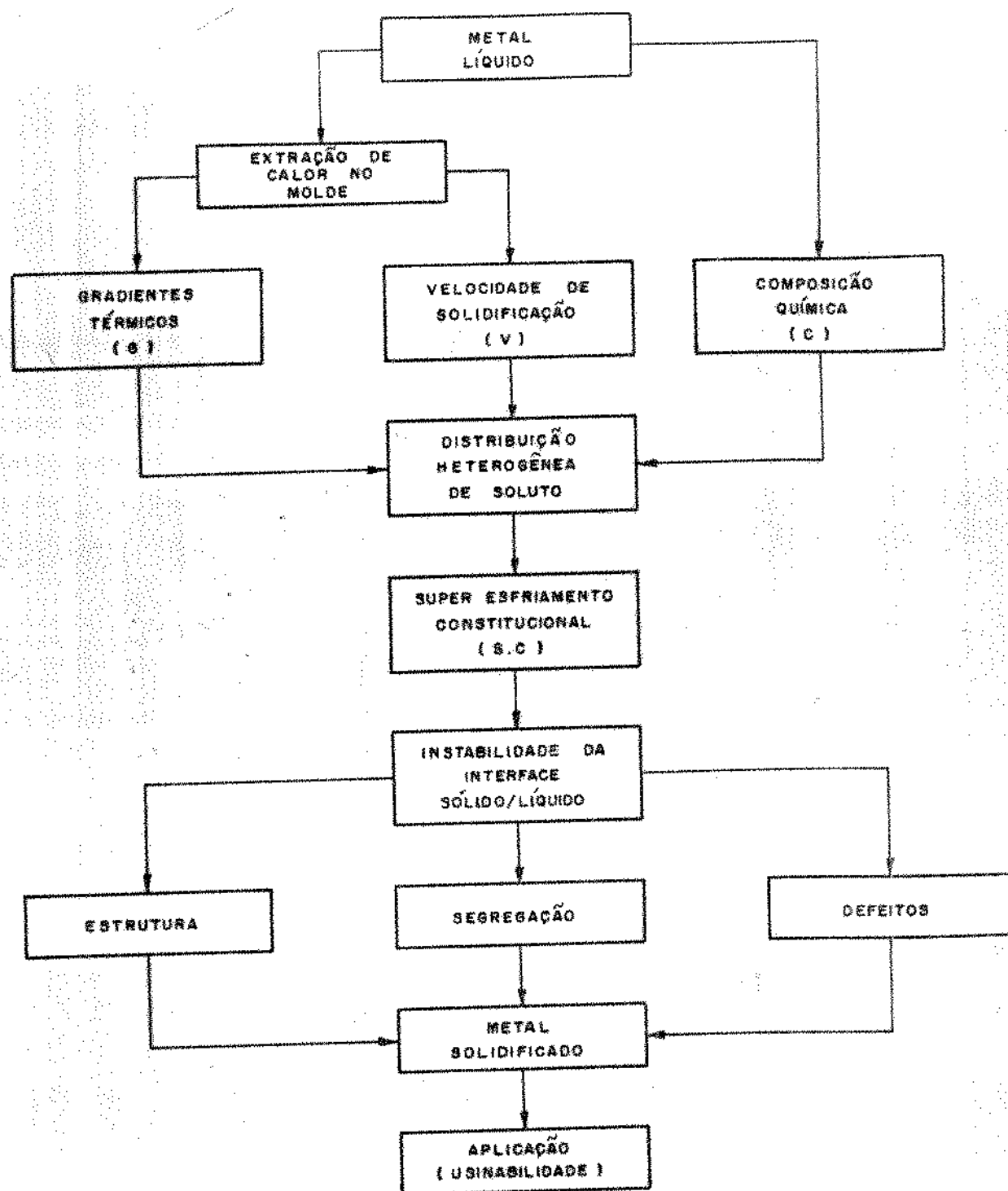


FIG. (14) ESQUEMA DA CORRELAÇÃO EXISTENTE ENTRE AS VARIÁVEIS E OS PARÂMETROS QUE REGEM O PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO.

de calor do sistema, comandando a cinética do processo; são elas:
[40]

- A resistência térmica do metal que solidifica R_S , que é inexistente no primeiro contato entre o metal e o molde, e aumenta à medida que o calor latente evolui da interface sólido-líquido, ou seja:

$$\begin{aligned} \text{Para } t = 0 & , \quad R_S = 0 \\ \text{Para } t > 0 & , \quad R_S > 0 \end{aligned}$$

- A resistência térmica do molde R_m , que também é inexistente no instante do primeiro contato entre o metal líquido e o molde. Esta aumenta à medida que o material do molde vai se saturando de calor:

$$\begin{aligned} \text{Para } t = 0 & , \quad R_m = 0 \\ \text{Para } t > 0 & , \quad R_m > 0 \end{aligned}$$

- A resistência térmica da interface metal-molde R_i , que apresenta um valor finito no instante do primeiro contato entre o metal e o molde, e que se mantém constante durante o processo:

$$\begin{aligned} \text{Para } t = 0 & , \quad R_i = \text{constante} \\ \text{Para } t > 0 & , \quad R_i = \text{constante} \end{aligned}$$

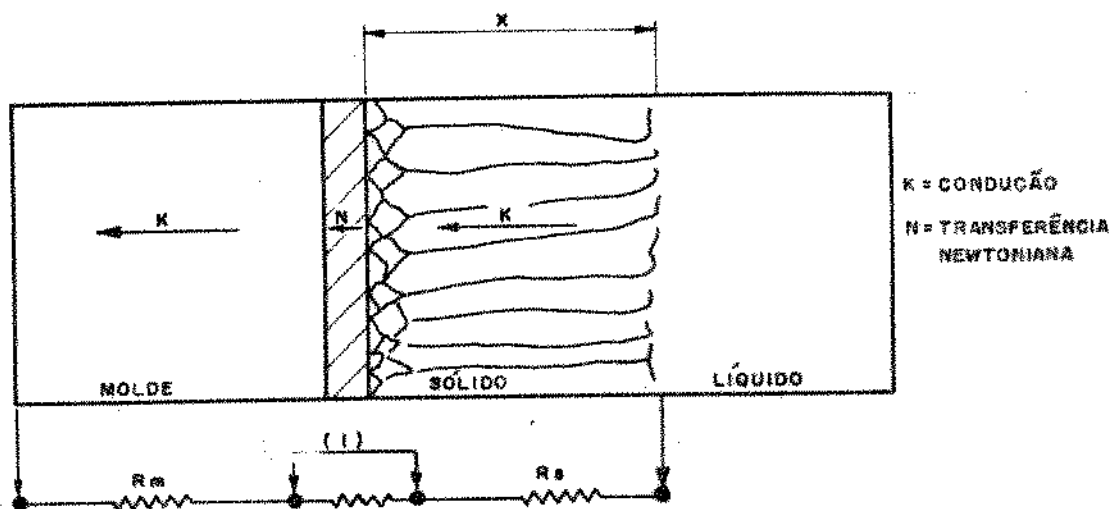


Fig. (15) Esquema ilustrativo de um sistema metal-molde em um da do instante da solidificação mostrando os modos essenciais de transferência de calor, e as resistências térmicas do sistema para uma espessura solidificada X.

O molde de areia geralmente não apresenta suficiente consistência própria para suportar a pressão metalostática do metal líquido nele vazado, motivo pelo qual é normalmente moldado com aglomerantes. Apesar de aglomerada, a areia de molde permanece permeável ao ar e aos gases, cuja presença aumenta sua isolamento térmica global. Nessas condições, a resistência térmica do material de molde, torna-se extremamente alta e muito superior às outras resistências térmicas do sistema metal-molde [40]. Nesse caso, as resistências térmicas da interface metal/molde e do metal sólido podem ser desprezadas no circuito da figura 15, ficando o sistema essencialmente reduzido à ação da resistência térmica do material do molde.

O fato da resistência térmica estar essencialmente concentrado na areia do molde faz com que os gradientes térmicos no metal sólido e na interface metal/molde sejam desprezíveis se comparados com os gradientes térmicos presentes no molde. Portanto, o sistema com molde de areia pode ser representado por um perfil térmico, em que:

$$T_{im} \approx T_{is} \approx T_f$$

onde:

- T_{im} = temperatura do molde junto à interface metal/molde
- T_{is} = temperatura do metal junto à interface metal/molde
- T_f = temperatura de fusão do metal

Do exposto, conclui-se que: para material de molde que apresenta maior resistência térmica (exemplo, molde de quartzo), a velocidade de solidificação é baixa. E para material de molde com menor resistência térmica (exemplo, molde de granalha), a velocidade de solidificação é relativamente maior. Também, secções espessas, significam velocidades de solidificação relativamente lentas, e secções finas, velocidades rápidas.

No que diz respeito às variações estruturais dos ferros fundidos, quando a velocidade de solidificação é relativamente lenta, ocorre uma apreciável grafitização, dependente sempre do teor de silício [41]. A estrutura será constituída de perlita e ferrita. Para esfriamento ainda mais lento e teor de silício mais

elevado, a cementita da perlita pode também decompor-se parcialmente, originando-se assim a estrutura constituída de veios de grafita, perlita e ferrita; esta estrutura confere ao material baixa dureza e boa usinabilidade.

Para esfriamento rápido (ex.: áreas adjacentes à parede do molde) não há muito tempo para a decomposição da cementita, de modo que, dependendo dos teores de carbono e de silício, pouca ou nenhuma grafitização ocorre, com tendência a formar uma matriz perlítica.

A velocidade de solidificação não influi apenas na grafitização; outra ação importante é na forma, distribuição e tamanho dos veios ou nódulos de grafita [38, 41]. Velocidades altas produzem veios finos e curtos, com uma distribuição dendrítica indesejável. Velocidades médias resultam em uma distribuição e tamanhos normais, e velocidades muito lentas (ex.: interior do fundido) resultam em uma distribuição de veios grosseiros de grafita. Neste último caso, há uma tendência de aumentar a quantidade de ferrita e reduzir a quantidade de cementita (Fe_3C) na estrutura bruta de fusão [46].

O mais importante exemplo de sensibilidade estrutural à secção transversal em estruturas brutas de fusão é, talvez, aquele devido à variação de distribuição, ou aumento no tamanho, das cavidades presentes numa secção transversal. Como há uma diminuição, durante a solidificação, da velocidade de esfriamento da periferia para o centro da peça, existe, então, uma tendência para que os gases e a contração volumétrica fiquem mais concentrados na parte central e nas maiores secções dos fundidos [38].

3.2 - USINABILIDADE DOS FERROS FUNDIDOS - REVISÃO CRÍTICA

3.2.1 - Caracterização dos ferros fundidos

O ferro fundido é um material onde a ocorrência e a distribuição de seus constituintes definem sua usinabilidade. Esta não é explicada simplesmente pela composição química, por ensaios de dureza ou de ruptura a tração [42], destacando-se com maior desempenho a microestrutura sobre a vida da ferramenta [43].

Costuma-se definir ferro fundido como "as ligas Fe-C cujo teor de carbono se situa acima de 2% aproximadamente". Devido a importância que o silício exerce nessa liga, o ferro fundido é considerado normalmente uma liga ternária Fe-C-Si.

Nesses termos, segundo Chiaverini [41], a definição de ferro fundido é a seguinte:

"Ferro fundido é uma liga ferro-carbono-silício, contendo normalmente manganês, fósforo e enxofre com 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".

Em determinados tipos, são adicionados elementos de liga, cuja função é conferir propriedades especiais. O carbono, juntamente com o silício, determinam a quantidade de grafita que é possível se formar. Entretanto, é o carbono que exerce maior importância, pois as propriedades mecânicas e tecnológicas são diretamente influenciadas pela quantidade desse elemento.

Dentro da denominação geral de "ferro fundido", podem ser distinguidos os diversos tipos de liga: ferro fundido cinzento, ferro fundido branco, ferro fundido mesclado, ferro fundido maleável, e ferro fundido nodular [41].

O ferro fundido cinzento apresenta uma fratura de coloração escura (daí a sua denominação), tendo como elementos de liga fundamentais o carbono e silício, onde a maior parte do carbono se encontra no estado livre (grafita lamelar) e a outra parte no estado combinado (Fe_3C).

O ferro branco, que é conhecido também como ferro fundido duro, apresenta uma coloração clara, onde quase todo o carbono se encontra na forma combinada (Fe_3C), sendo de usinagem difícil ma [6].

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

O ferro maleável se solidifica como ferro fundido branco, sendo posteriormente submetido ao tratamento térmico de maleabilização.

O ferro nodular apresenta o carboneto de ferro, e a grafita em forma esferoidal (nodular), produto bastante resistente que se comporta elasticamente como o aço fundido.

Considerando-se que o presente trabalho trata do estudo dos ferros fundidos cinzento e nodular, maiores comentários sobre esses materiais, serão abordados adiante.

3.2.2 - Influência da composição química na usinabilidade dos ferros fundidos.

A determinação da influência dos elementos de liga que compõem os ferros fundidos é bastante difícil, tendo em vista três fatores [44]: a reação entre si desses elementos, seu efeito na microestrutura e a taxa de esfriamento.

O desempenho dos elementos químicos mais comuns sobre a usinabilidade dos ferros fundidos pode ser assim analisada:

a) Silício

O silício é um poderoso grafitizante usado nos ferros fundidos como elemento controlador da formação da grafita. No ferro fundido cinzento, o efeito do silício é a redução de carboneto de ferro duro e o aumento da quantidade de grafita que se apresenta em forma de lamelas. A estrutura resultante é de boa usinabilidade [6], quando este elemento é adicionado em proporção adequada. O ferro com baixo teor de silício apresenta uma fratura mesclada com pouco carbono livre e muito carbono combinado, apresentando por isto, baixa usinabilidade.

b) Fósforo

O fósforo é um estabilizador relativamente forte do carboneto de ferro; sua principal ação é na estrutura, porque forma com o ferro e o carbono um composto de natureza eutética, de aparência branca e perfurada, chamado steadita [41].

A steadita é um constituinte de natureza eutética, compreendendo partículas de fosfeto de ferro Fe_3P e carboneto de ferro Fe_3C . Ocorre em áreas interdendríticas, formando uma segregação, pois essas áreas são as últimas que solidificam. A steadita é relativamente dura e quebradiça, influenciando de ma-

neira prejudicial a usinabilidade [10]. Entretanto, esta contribui na resistência ao desgaste e forma uma estrutura que é desejável em algumas aplicações, tal como rolamentos [22].

c) Cobre

A adição de cobre no ferro fundido aumenta sua resistência e dureza, tendo função anti-ferritizante, ou seja, é um estabilizador da perlita [22]. O efeito do cobre também é de produzir dureza homogênea pela eliminação de "pontos" duros (carbonetos livres) e "pontos" moles (ferrita livre) no interior dos fundidos, sem contudo afetar diretamente as propriedades da grafita. O resultado disto é uma melhor usinabilidade [56]. Outros pesquisadores [47] afirmam que o ferro fundido ligado ao cobre com dureza de 200 HB, apresenta a mesma usinabilidade que o ferro fundido não ligado com dureza de 181 HB.

d) Enxofre e manganês

O efeito do enxofre deve ser analisado em conjunto com o teor de manganês no ferro. Quando se forma sulfeto de manganês, o enxofre promove a redução da matriz perlítica [22]. A influência desses elementos químicos já foi objeto de uma série de pesquisa na usinabilidade dos ferros fundidos cinzento e aços [48]. Os estudos realizados no ferro cinzento, revelaram um aumento na vida da ferramenta de aproximadamente 150% quando se fazia variar a percentagem de sulfeto de manganês, com teores de enxofre de 0,02 para 0,12%. Os autores supõem que esse aumento seja consequência do efeito lubrificante adicional proporcionado pelos sulfetos de manganês, reduzindo o atrito e conseqüentemente, a temperatura de corte. Os ensaios de dureza não apresentaram variações significativas [48].

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 [58].

Em pesquisas alemãs [58], 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 a adição simultânea de maior teor de en-

xofre e manganês provoca a formação de maior número de sulfetos que melhoram consideravelmente a usinabilidade. Resultados semelhantes também foram encontrados por pesquisadores americanos [48].

e) Cromo

O cromo tem tendência de formar ferro fundido branco durante a solidificação, resultando uma estrutura mais resistente ao desgaste. A usinabilidade é prejudicada pela presença deste poderoso estabilizador de carbonetos [10]. Sua presença é verificada em pequenas quantidades, e é função da proporção de sucata usada.

O cromo em percentagem de 0,15%, refina a perlita e a grafita, endurecendo a matriz metálica [10].

f) Outros elementos de liga

Outros elementos de liga tais como: Mg, Zn, Al+Si, Ce e Ni, adicionado ao ferro fundido em percentagens limitadas [11, 30], melhoram a usinabilidade.

A tabela IV apresenta a faixa de composição química dos principais tipos de ferros fundidos [22].

Material	Faixa de Composição Química (% em peso)				
	%C	%Si	%Mn	%S	%P
FC	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	3,00	1,80	0,10	0,03	0,005
	a 4,00	a 2,80	a 1,00		a 0,10
FMP	2,20	1,00	0,20	0,07	0,10
	a 2,80	a 1,60	a 0,50	a 0,15	
FMB	2,80	0,40	0,20	0,10	0,10
	a 3,40	a 0,80	a 0,50	a 0,25	

TABELA IV - 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

3.2.3 - Influência da microestrutura na usinabilidade dos ferros fundidos

A usinabilidade dos ferros fundidos é diretamente afetada pela distribuição e proporção de seus diversos constituintes. A dureza é um bom indicador da microestrutura e também da usinabilidade, porém esta não é uma condição dependente, pois diferentes microestruturas podem ter diferentes propriedades de usinagem apresentando contudo a mesma dureza [10, 22].

A tabela V [41] e as figuras 16 e 17 [22] mostram 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. Pela tabela V, tomando-se como exemplo uma estrutura com 95% de perlita fina e 5% de cementita, a velocidade de corte permitida é de apenas 1/4 daquelas usadas para ferros fundidos completamente ferríticos.

Aumento da vida da ferramenta ←					
matriz	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.					

TABELA V - Influência da microestrutura dos ferros fundidos na vida da ferramenta e velocidade de corte.

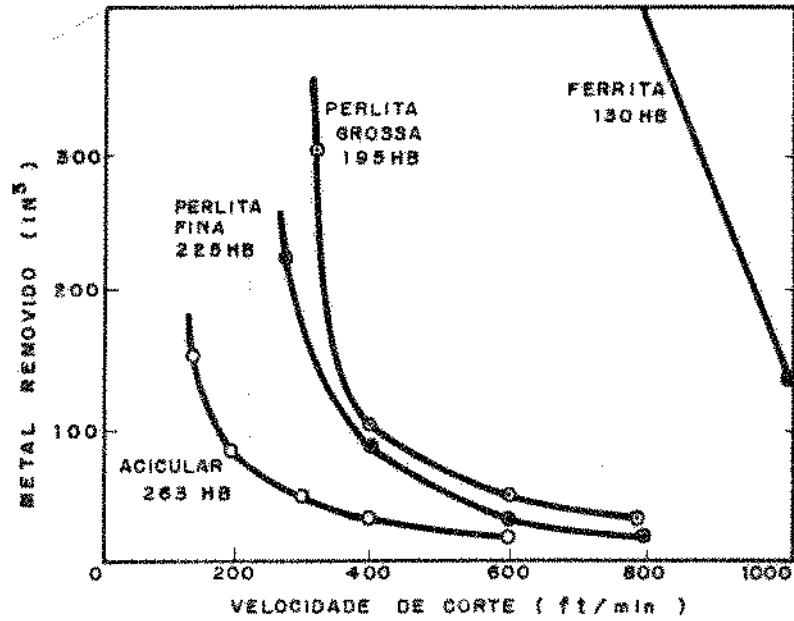


FIG. (16) INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA E VELOCIDADE DE CORTE SOBRE A VIDA DA FERRAMENTA NA OPERAÇÃO DE TORNEAMENTO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO [14]

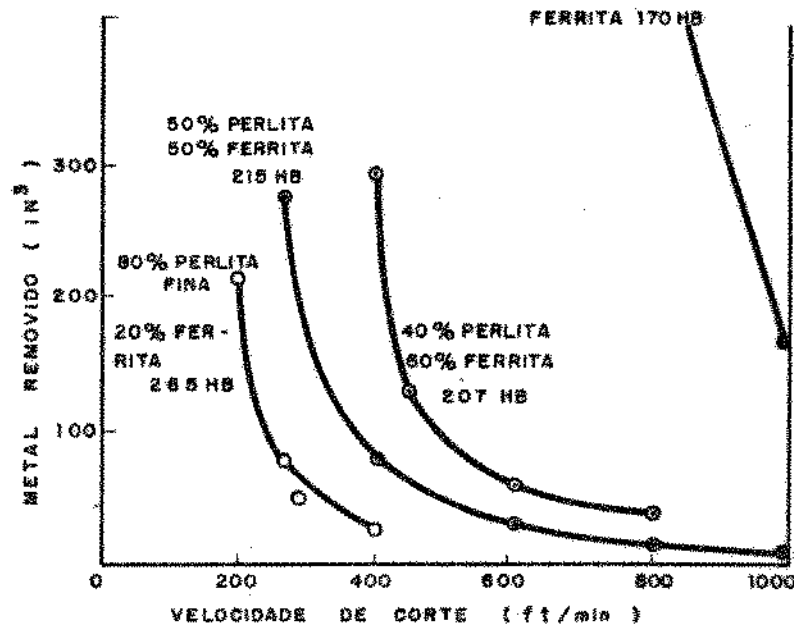


FIG. (17) INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA E VELOCIDADE DE CORTE SOBRE A VIDA DA FERRAMENTA NA OPERAÇÃO DE TORNEAMENTO DO FERRO FUNDIDO NODULAR [14]

A influência dos microconstituintes mais comuns na usinabilidade dos ferros fundidos pode ser resumida da seguinte forma:

a) Grafita

A presença da grafita no ferro é de suma importância no estudo da usinabilidade, por ser o elemento que determina as propriedades mecânicas do ferro fundido. Porém, a vida da ferramenta depende também da matriz da microestrutura que circunda a grafita. Esta é formada pela decomposição do carboneto de ferro:



ou carboneto de ferro \longrightarrow austenita + grafita

Esta decomposição depende da velocidade de solidificação e da presença de determinados elementos de liga [38].

A grafita cria descontinuidades na matriz facilitando com isto a ruptura do cavaco [50]. Além disso, atua como lubrificante sólido 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 no ferro fundido. O crescimento da proporção da mesma, reduz as forças de corte, principalmente nos ferros fundidos com matriz ferrítica [49].

A quantidade e tamanho das lamelas de grafita podem ser os responsáveis pela boa usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos, no entanto, quando estas são muito grandes, podem reduzir a usinabilidade por causarem cortes descontínuos. Pesquisas realizadas [10] com o ferro fundido nodular em ensaios de furação mostraram que, para materiais com dureza semelhantes a usinabilidade aumenta com a maior proporção dos nódulos de grafita.

O aspecto, dimensão e a forma de apresentação da grafita são normalizados (Norma A.B.N.T.), apresentando-se como mais usinável, a grafita tipo A, e desaconselhável a usinagem a grafita tipo D [43].

b) Ferrita

Este microconstituente pode ser ferro puro, ou ainda, conter outros metais que são dissolvidos na forma de solução sólida [22].

A matriz ferrítica pode ser obtida no estado bruto de fundição em alguns tipos de ferro. Com dureza entre 100 a 150 HB, é o microconstituente de melhor usinabilidade, excetuando-se apenas os casos em que encontra-se fortemente ligado com cromo, silício e alumínio. Com exceção da grafita, a ferrita apresenta mais baixa dureza com relação a outros constituintes do ferro.

c) Perlita

A perlita é um microconstituente comum nos ferros fundidos de média resistência e dureza, com propriedades mecânicas intermediária entre a ferrita e a cementita. A matriz perlítica combina muito bem sua boa resistência à ruptura e à abrasão com uma boa usinabilidade. Sua dureza se situa entre 150 e 350 HB. A perlita fina é mais resistente e menos usinável, enquanto que a perlita grossa é menos resistente, com melhor usinabilidade [46]. A "almofada" de ferrita na perlita protege a ferramenta contra a abrasão inadequada, e são facilmente rompidas [17].

Nos ferros fundidos, o carbono que combina com a perlita é função da taxa de esfriamento [22].

d) Eutético fosforoso (steadita)

A steadita é um microconstituente de dureza relativamente alta que fica fora da rede cristalina, e com o aumento do teor de fósforo a usinabilidade começa a cair [43]. Apresenta uma microdureza acima de 800 KNOOP [33].

e) Cementita (carbonetos livres)

A cementita ou carboneto de ferro Fe_3C , se caracteriza pela sua elevada dureza, chegando a 800 HV ou mais. Mesmo em proporção muito pequena, reduz acentuadamente a usinabilidade da ferramenta, principalmente para altas velocidades, por se tratar de um constituinte extremamente abrasivo [51]. A tabela V mostra

que, uma percentagem de apenas 5% de cementita no ferro fundido, é suficiente para reduzir de maneira significativa a velocidade de corte.

f) Austenita

A austenita possui baixa condutibilidade térmica, e isto faz com que a velocidade de corte seja reduzida. Sua presença se verifica somente nos ferros fundidos com altos teores de Ni, Cu e Mn. A dureza desse microconstituente é de 120 a 160 HB. A usinabilidade da austenita nos ferros fundidos é melhor do que a dos aços austeníticos [43].

g) Outras estruturas

A presença de elementos de liga, e o tratamento térmico dos ferros fundidos podem resultar em estruturas: martensíticas, sorbíticas, acicular, bainíticas e outras ainda, de usinagem difícilima, principalmente nos casos em que a presença de carbonetos é significativa [43].

3.2.4 - Caracterização e usinabilidade dos ferros fundidos cinzento e nodular

a) Ferro fundido cinzento

Dentre os ferros fundidos, o cinzento tem maior aplicação, devido a seus característicos de: fácil fusão e moldagem, boa resistência mecânica, excelente usinabilidade e boa capacidade de amortecimento. Sua fratura mostra uma coloração escura com grafita em forma de veios ou lamelas [41].

Como em todas as ligas metálicas, existe uma correlação íntima entre as propriedades do ferro fundido e sua estrutura, correlação essa que, no caso particular do ferro fundido cinzento, é mais estreita e mais complexa, tendo em vista a presença de carbono livre na forma de grafita. A espessura da peça (que é função da velocidade de solidificação) influencia necessariamente a forma, o tamanho e a distribuição com que os veios de grafita se apresentam.

Segundo a A.B.N.T. [52] os ferros fundidos são designados pelas letras FC, indicativas de "ferro fundido cinzento", seguindo-se de dois algarismos representativos do limite máximo de resistência à tração. A classe FC25 é de boa fundilidade e usinabilidade, e se aplica principalmente em elementos estruturais, tais como barramentos, cabeçotes e mesas de máquinas-ferramentas.

O efeito dos elementos carbono, silício e fósforo na quantidade de grafita formada para baixas velocidades de esfriamento, tal como ocorre em moldes de areia, pode ser expresso em termos de carbono equivalente por meio da relação empírica:

$$\text{C.E. \%} = \text{C\%} + \frac{\text{Si\%} + \text{P\%}}{3}$$

As impurezas podem ter também efeito suficientemente forte na formação da grafita - tamanho, forma e distribuição, de sorte a poder alterar significativamente a simples relação entre o C.E.% e a velocidade de esfriamento.

A dureza nos ferros fundidos cinzentos, varia desde 100 HB para aqueles de grande usinabilidade, até valores superiores de 600 HB, para os ferros fundidos coquilhados. A interpretação das determinações de dureza pode levar a julgamentos errôneos sobre a qualidade do material, face à presença de grande quantidade de grafita, que se esmaga com facilidade. Recomenda-se portanto, o uso do processo Brinell com esfera de 10mm e carga de 3000 Kg.

Pode-se admitir, como nos casos do aço, uma relação entre a resistência a tração e a dureza Brinell dos ferros fundidos. De acordo com MacKenzie [41], a equação mais indicativa dessa relação é a seguinte:

$$\text{Resist. a tração} = 1,82 \cdot \text{H.B.}$$

Outros pesquisadores [53, 54] apontam melhor vida da ferramenta nos casos em que esse metal é submetido a tratamento térmico, ou quando aumenta-se o teor de carbono equivalente.

Com relação as demais ligas ferrosas, o ferro fundido cinzento só apresenta menor usinabilidade comparado aos ferros fundidos maleáveis [32].

b) Ferro fundido nodular

O ferro fundido nodular ou dúctil caracteriza-se pela sua ductilidade, tenacidade e resistência mecânica. Seu limite de escoamento é mais elevado, comparado com o ferro fundido cinzento; e, apesar de mais alta pressão específica de corte e resistência, apresenta boa usinabilidade.

A estrutura resultante, após o esfriamento da solução, apresenta o carboneto de ferro e grafita em forma esferoidal, devido a presença de pequena quantidade de magnésio ou cério. Essa forma da grafita não interrompe a continuidade da matriz tanto quanto a grafita em lamelas, resultando assim, melhor ductilidade [41].

A A.B.N.T., pela sua especificação P-EB-585, classifica os ferros nodulares, que ela designa como ferro fundido com grafita esferoidal. São designados pelas letras FE, seguindo-se de quatro algarismos, os dois primeiros representam o limite de resistência a tração e os dois subsequentes indicam o alongamento. Os tipos FE4212 e FE6002 são igualmente muito usados, o primeiro contém menos Mn e mais Si que o segundo. Este último contém, portanto, maior quantidade de Mn ou preferencialmente, pequenas adições de Sn e Cu. O cobre tem a função de perlitizar a estrutura.

O ferro fundido nodular é empregado em engrenagens, equipamentos agrícolas, tambores de freio e semelhantes.

Estudos realizados [55] com o ferro fundido nodular, mostraram que, um jato de óleo solúvel e água, dirigido sobre a superfície de incidência e saída da ferramenta, tem sido bastante eficiente na redução da aderência de flanco. Citam-se ainda que, na operação de furação com brocas helicoidais sem uso de líquido refrigerante, a velocidade de corte pode ser aumentada em dobro depois da camada externa ter sido removida.

As forças de corte e adesão de flanco foram analisadas [55] nos ferros fundidos nodulares 60, 80 e 100, onde se conclui que os ferros fundidos de classes 80 e 100 apresentaram praticamente a mesma usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos de alta resistência, com valores de dureza Brinell semelhantes. Os mesmos pesquisadores estudaram também a influência das condições de usinagem sobre a adesão de flanco no ferro de classe 60, con-

cluindo que, com o decréscimo da taxa de avanço, há um aumento da velocidade crítica de corte, na qual a aresta postiça ocorre. Várias recomendações são feitas para prevenir a adesão de flanco.

CAPÍTULO 4

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 - OS FERROS FUNDIDOS ENSAIADOS

4.1.1 - Obtenção dos corpos de prova de ferros fundidos

Os metais pesquisados foram os ferros fundidos nodular e cinzento, designados pela A.B.N.T. por FE-6002 (DIN GGG60), FE-4212 (DIN GGG42) e FC-25 (DIN GG25). Esses metais foram fundidos em forno elétrico com potência de 500 kW, do tipo indução, frequência de 1000 hertz, com autonomia de atingir temperaturas na ordem de 1700°C e capacidade de até 1000 kg/h. A operação de vazamento foi realizada procurando-se manter sempre que possível as mesmas condições operacionais, em moldes de areia à base de quartzo e granalha, com variação de modelos convencional (madeira) e de poliestireno expandido. O processo de fundição foi realizado em conjunto, com vários canais de alimentação, obtendo-se assim uma série de 12 lingotes, conforme é apresentado na tabela VI.

MATERIAL	Molde: quartzo		Molde: granalha		
	Modelo:		Modelo:		T _v (°C)
FE 6002	conv.	pol. exp.	conv.	pol. exp.	1340
FE 4212	conv.	pol. exp.	conv.	pol. exp.	1340
FC 25	conv.	pol. exp.	conv.	pol. exp.	1320

TABELA VI - Condições de processamento dos 12 lingotes brutos de fundição.

Com o objetivo de detectar possíveis influências e efeitos colaterais na usinabilidade dos materiais, foi realizado um estudo onde se procurou verificar a variação da composição química, o tipo de microestrutura, a variação da dureza Brinell, e a presença de possíveis defeitos de fundição. Tais estudos são apre

sentados em seguida.

4.1.2 - Composição química

A análise química dos materiais foi realizada "via úmida" através do laboratório da FEMAQ, cujos resultados foram transcritos para a tabela VII. O ferro fundido cinzento FC 20 fabricado pelo processo de fundição contínua em coquilha de grafite, foi tomado como padrão de usinabilidade, e sua composição química também é apresentada na citada tabela.

As amostras analisadas foram retiradas dos materiais em forma de cavaco, na mesma região onde foram realizados os ensaios de usinabilidade na operação de torneamento. Segundo Colpaert, esta é uma maneira conveniente de se proceder a análise química.

É importante salientar que, a composição química do lingote pode apresentar variações, sendo mais puro na periferia e na base, e mais impuro nas proximidades do vazio.

MATERIAL	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% PESO)						
	C%	Si%	Mn%	Cu%	Cr%	P%	S%
FE 6002	3,66	2,60	0,50	0,60	-	0,069	0,006
FE 4212	3,60	2,70	0,14	-	-	0,080	0,008
FC 25	3,22	1,56	0,90	-	0,033	0,085	0,020
FC 20	3,24	2,07	0,80	-	-	0,170	0,070

TABELA VII - Composição química dos ferros fundidos usados no trabalho.

4.1.3 - Análise micrográfica dos corpos de prova

A estrutura do ferro fundido, como já foi exposto, está intimamente ligado à sua usinabilidade. Sendo assim, a análise metalográfica foi realizada, com a intenção de verificar se os corpos de prova eram homogêneos ao longo da espessura transversal da parede, avaliar a diferença de microestrutura entre os vários materiais, e a correlação que poderia existir com a dureza e a usi-

nabilidade.

As micrografias foram registradas seccionando-se transversalmente, numa região central, todos os corpos de prova usados para os ensaios de usinabilidade. A superfície a ser analisada, foi inicialmente submetida ao corte com cortador abrasivo ("cut-off"), usando-se bastante fluido refrigerante e pequeno esforço, para evitar possíveis alterações na estrutura, tais como encruamentos locais, têmperas e revenidos. Posteriormente, os corpos de prova foram lixados e polidos, com lixas 220, 320, 400, 600 e polimento em pasta de diamante 6 μm , 3 μm , 1 μm e 0,1 μm respectivamente.

A figura 18 apresenta a região do corpo de prova sobre a qual efetuou-se a análise micrográfica e a medição de dureza Brinell.

Para cada material, foram registradas quatro micrografias: duas sem ataque e aumento de 100X (periferia e interior) e duas com ataque (nital 2%) e aumento de 500X (regiões próximas à periferia e interior).

Equipamento usado nas micrografias:

Microscópio metalográfico

Modelo: PME

Fabricante: Olympus

As figuras do Apêndice IV apresentam os resultados das micrografias.

Comentários:

Ferro fundido nodular FE 4212 - Este material apresentou uma matriz ferrítica-perlítica, com predominância da ferrita ao redor dos nódulos de grafita. Os nódulos de grafita apresentaram variações de sua forma e tamanho em função da região analisada do corpo de prova (periferia e interior), como também do tipo de material de molde. Nos fundidos em molde de quartzo, os nódulos de grafita foram do tipo VI-5 na região periférica, e do tipo V-4 no seu interior. Enquanto que, nos fundidos em molde de granelha, os nódulos de grafita foram do tipo VI-6 na região periférica, e do tipo V-5 no seu interior. Desses resultados conclui-se que grande quantidade de grafita explosiva (forma V) foi encontrada no seu interior, percebendo-se também menores nódulos de grafi

ta, quando o material foi vazado em molde de granalha.

As figuras IV.1 a IV.4 comprovam a presença de porosidades no interior dos ferros fundidos FE 4212, o que leva a acreditar que se trata de uma estrutura heterogênea, devido a algum problema de fundição, tais como contração volumétrica ou concentração de gases.

Ferro fundido nodular FE 6002 - O ferro FE 6002 apresentou uma matriz perlítica (figuras IV.13, IV.14, IV.15 e IV.16). Os fundidos em molde de quartzo, apresentaram nódulos de grafita do tipo VI 5/6 na região periférica, e do tipo VI 5 no seu interior; enquanto que, nos fundidos em molde de granalha, os nódulos de grafita foram do tipo VI 6 na região periférica, e do tipo VI 5 no seu interior, apresentando uma estrutura homogênea.

Do exposto, conclui-se que: os materiais FE 4212 e FE 6002 apresentaram tamanho menor dos nódulos de grafita quando processados em molde de granalha. Da mesma forma esses nódulos foram menores, quando analisados na região periférica do lingote, comparado com o seu interior. Esse fato leva a concluir também que a quantidade de nódulos por mm^2 é bem menor em todos os casos em que os metais foram vazados em molde de quartzo, comparados com os fundidos em molde de granalha. Essa afirmação foi verificada por contagem de nódulos por mm^2 , segundo a norma A.S.T.M.

Ferro fundido cinzento - Com uma matriz predominantemente perlítica, o ferro fundido cinzento FC 25 apresentou lamelas de grafita de forma I, com distribuição A e C. Os fundidos em molde de quartzo apresentaram grafita de tamanho 3 no seu interior e grafita de tamanho 4 na região periférica. Nos fundidos em molde de granalha, o tamanho das lamelas de grafita foram do tipo 5 e 4 na periferia, e grafita de tamanho 3 no seu interior.

O tamanho das lamelas de grafita também foram menores, quer nos fundidos em molde de granalha, quer na região periférica, de maneira geral.

4.1.4 - Dureza Brinell dos corpos de prova

As amostras utilizadas nos ensaios de dureza foram obtidas da mesma seção transversal central, dos corpos de prova usa-

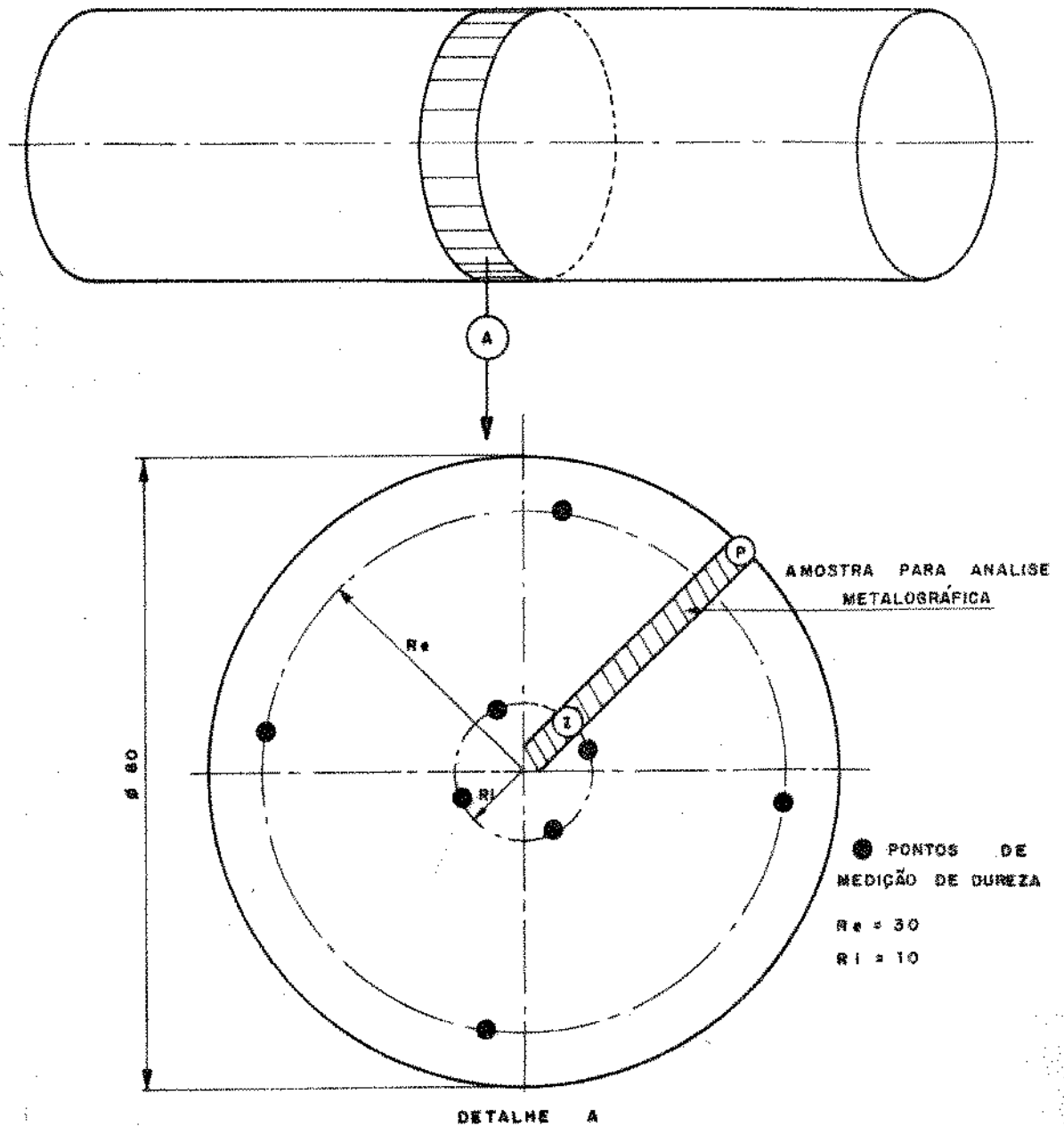


FIG. (18) CORPO DE PROVA PARA A DETERMINAÇÃO DA DUREZA AO LONGO DA ESPESSURA TRANSVERSAL DA PAREDE DO LINGOTE E REGISTRO DA MICROGRAFIA, USADO NOS ENSAIOS DE USINABILIDADE.

dos para os ensaios de usinabilidade na operação de faceamento e análises micrográficas.

Cada amostra obtida foi polida mecanicamente com lixas cada vez mais finas, obtendo-se assim uma perfeita impressão da esfera da máquina, com uma leitura bastante confiável. Essas impressões foram feitas com esfera de 10 mm, carga de 3000 Kgf e tempo de 30 segundos, por se constituir a combinação mais adequada para os ferros fundidos. A distância entre o centro de duas impressões vizinhas foram mantidas de acordo com as exigências da norma ABNT MB 60/80.

A figura 18 apresenta os locais selecionados para o registro das impressões de dureza, verificando-se desse modo a variação radial desta, ao longo da espessura de parede do lingote.

Equipamento usado nos ensaios de medição de dureza:

Máquina Universal de ensaios

Fabricante: Otto Wolpert - Werke - Alemanha

Tipo: BK 300

Capacidade: 4000 Kgf

Acionamento: hidráulico

Leitura do diâmetro de impressão: Lupa

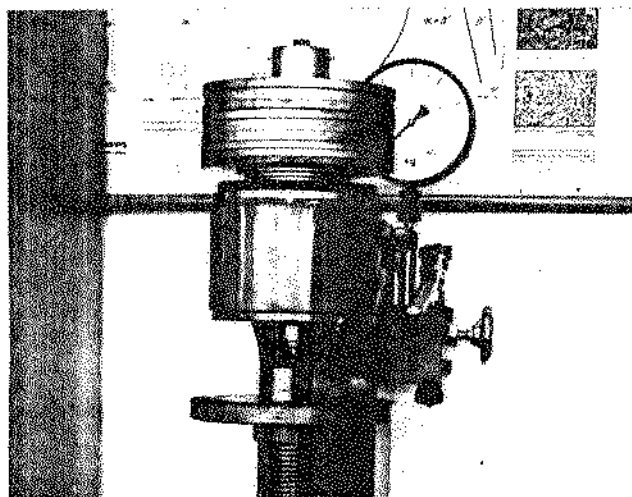


Fig. (19) Fotografia de medição de dureza Brinell de um corpo de prova de usinabilidade.

A tabela VIII apresenta os resultados experimentais dos ensaios de dureza realizados, os quais permitem concluir que: não houve uma variação considerável de dureza na região de seção transversal dos corpos de prova. Contudo, percebe-se uma maior dispersão das medidas no ferro fundido FE 4212, com desvio padrão em escala de valor de até 5, na região mais próxima do centro do lingote.

A influência do material de molde se faz notar pela característica de que, todos os metais fundidos em molde de granelha apresentaram maior dureza Brinell do que os metais fundidos em molde de quartzo, para um determinado tipo de ferro fundido. Fica caracterizada também, a ausência da influência do material do modelo, pois não se verificou mudança significativa de dureza devido à variação do modelo convencional para poliestireno expandido.

Conclui-se ainda que, o material de maior dureza Brinell é o FE 6002, seguido do FE 4212, e por último o FC 25 (250 HB, 190 HB e 170 HB, respectivamente).

4.2 - OS ENSAIOS DE USINABILIDADE

Os ensaios de usinabilidade foram realizados segundo dois critérios: o do aumento progressivo da velocidade de corte em progressão geométrica no torneamento cilíndrico, e o do faceamento de Mathon, ambos padronizados pela norma experimental francesa AFNOR AO3-654. Esses ensaios tinham o objetivo de comparar a usinabilidade dos materiais entre si, conforme a sua variação metalúrgica. Foram tomados como constantes ao longo de cada critério de ensaio: a máquina ferramenta, material da ferramenta, sua geometria, e as condições de usinagem.

Para se obter bons resultados em ensaio de usinabilidade, é indispensável o controle cuidadoso de cada variável. Com esse pensamento, foram realizadas aferições no avanço e profundidade de corte com auxílio de um relógio comparador, constatando-se perfeita coerência entre os valores indicados na tabela do cabeçote do torno e a leitura do relógio comparador. Na medição de rotação da árvore do torno foi utilizado um tacômetro de procedên

MATERIAL		Posição de Medição	Dureza HB 10/3000 Kgf				Média	Desvio Padrão	Result. Parcial Média e Desv. Pa.	Result. Final Média e Desv. Pa.
Nomenclatura	Processo									
FE4212	quartzo Conven.	Re	177	178	183	175	179,0	3,8	Re=180,6 S=3,7	Re=190,4 S=12,0
		Ri	189	191	187	189	189,0	1,6		
	quartzo pol.exp.	Re	177	183	184	179	180,3	3,3	Ri=184,7 S=6,0	Ri=191,4 S=8,9
		Ri	177	177	182	187	180,5	4,7		
	granalha conven.	Re	207	200	197	198	200,5	4,5	Re=199,25 S=1,76	R _T =190,9
		Ri	198	200	195	194	196,7	2,7		
	granalha pol.exp.	Re	200	195	196	200	198,0	2,9	Ri=197,4 S=1,06	S _T =0,70
		Ri	200	195	194	204	198,2	4,6		
FC25	quartzo conven.	Re	170	170	172	172	171,0	1,1	Re=172,0 S=1,4	Re=174,0 S=6,0
		Ri	170	170	175	170	171,2	2,5		
	quartzo pol.exp.	Re	172	174	174	172	173,0	1,1	Ri=171,1 S=0,14	Ri=170,3 S=1,1
		Ri	174	172	170	169	171,0	2,2		
	granalha conven.	Re	178	177	174	170	175,0	3,6	Re=176,0 S=10,6	R _T =172,2
		Ri	174	172	170	174	172,0	1,8		
	granalha pol.exp.	Re	178	177	173	178	176,0	2,2	Ri=169,5 S=3,5	S _T =4,1
		Ri	169	168	168	164	167,0	2,0		
FE6002	quartzo conven.	Re	249	244	245	250	248,0	2,1	Re=246,0 S=7,0	Re=250,0 S=3,8
		Ri	255	251	255	256	254,0	2,2		
	quartzo pol.exp.	Re	244	243	239	239	243,0	2,6	Ri=251,0 S=3,5	Ri=253,2 S=3,0
		Ri	248	246	248	254	249,0	3,4		
	granalha conven.	Re	253	250	254	249	251,0	2,4	Re=253,5 S=3,5	R _T =252,0
		Ri	255	253	255	255	254,0	1,0		
	granalha pol.exp.	Re	256	255	255	258	256,0	1,4	Ri=255,2 S=1,6	S _T =1,8
		Ri	256	255	255	259	256,6	1,9		

Re = 30 mm , Ri = 10 mm

TABELA VIII - Resultados experimentais dos ensaios de dureza Brinell.

cia alemã conectado à extremidade anterior desta. Os resultados apresentaram pequena divergência com relação aos valores indicados na tabela do cabeçote (essa divergência foi tão pequena que não alcançou a cada dos 4%). Considerando-se esse fato, os valores reais computados no cálculo da velocidade de corte, foram naturalmente, aqueles indicados pela leitura do tacômetro.

Com o objetivo ainda de reduzir ao máximo os possíveis erros que poderiam mascarar os resultados, aumentando a confiabilidade da operação, várias precauções foram adotadas, tais como:

- a) Nivelamento prévio da máquina ferramenta, com nível de precisão de 0,02 mm/m, marca MITUTOYO.
- b) Repetição de cada ensaio, três vezes no mesmo corpo de prova, computando-se assim a média dos resultados, conforme recomenda a norma experimental.
- c) Cronometragem do tempo de corte até a queima da ferramenta (veja tabela I.1)
- d) Os ângulos e o raio de ponta das ferramentas foram cuidadosamente controlados e mantidos constantes ao longo dos ensaios, como também a rugosidade superficial de cada ferramenta, não excedendo a 0,18 Ra.
- e) As afiações das ferramentas foram executadas com fluido refrigerante, e entre uma reafiação e outra, foram eliminados cerca de 5 mm da ponta da mesma, com o objetivo de evitar qualquer transformação metalúrgica devido à elevação da temperatura.
- f) O ângulo de posição e a altura, foram criteriosamente controlados, quando da colocação da ferramenta na torre da máquina ferramenta.

Equipamentos usados nos ensaios de usinabilidade:

Máquina ferramenta: Torno IMOR

Modelo: S 20

Fabricante: Indústria Romi S.A. - Santa Bárbara D'oeste
S.P.

Distância entre pontas: 1000 mm

Diâmetro admissível sobre o barramento: 325 mm

Potência: 5 CV

Máquina usada para afiação das ferramentas

Fabricante: Vigorelli do Brasil

Tipo: AFU2

Medidor de rotação do torno:

Tacômetro

Fabricante: DEUMO - Alemanha

Faixa de medição: 40 - 50.000 rpm

Equipamentos diversos:

Relógio comparador

Marca: Mitutoyo

Resolução: 0,01 mm

Paquímetro:

Marca: Mitutoyo

Resolução: 0,05 mm

Faixa de medição: 0 a 250 mm

Cronômetro:

Marca: ILONA

Resolução: 0,2 seg

Nível:

Marca: Mitutoyo

Precisão: 0,02 mm/m

4.2.1 - Procedimento dos ensaios de usinabilidade no método do torneamento cilíndrico.

Nessa primeira fase de ensaios, foi utilizado o método do aumento progressivo da velocidade de corte, já descrito no item 2.4.2.1.; havendo entretanto, a necessidade de inserir duas adaptações nas condições apresentadas pela norma, para viabilizar a utilização do equipamento disponível e compatibilizá-lo com o corpo de prova. A primeira adaptação diz respeito ao incremento da velocidade de corte, de razão 1,25, ao invés de 1,12. A outra adaptação foi de calcular a espessura de cada anel com um comprimento de corte usinado de 15 m, ao invés de 25 m.

Após o processo de fundição, os corpos de prova para os ensaios de usinabilidade apresentaram as seguintes dimensões: comprimento: 340 mm; diâmetro externo: 80 mm para os ensaios na periferia, e 74 mm para os ensaios no interior do corpo de prova; espessura de cada anel: $L_0 = 16$ mm.

A figura 20 apresenta esquematicamente as características geométricas do corpo de prova.

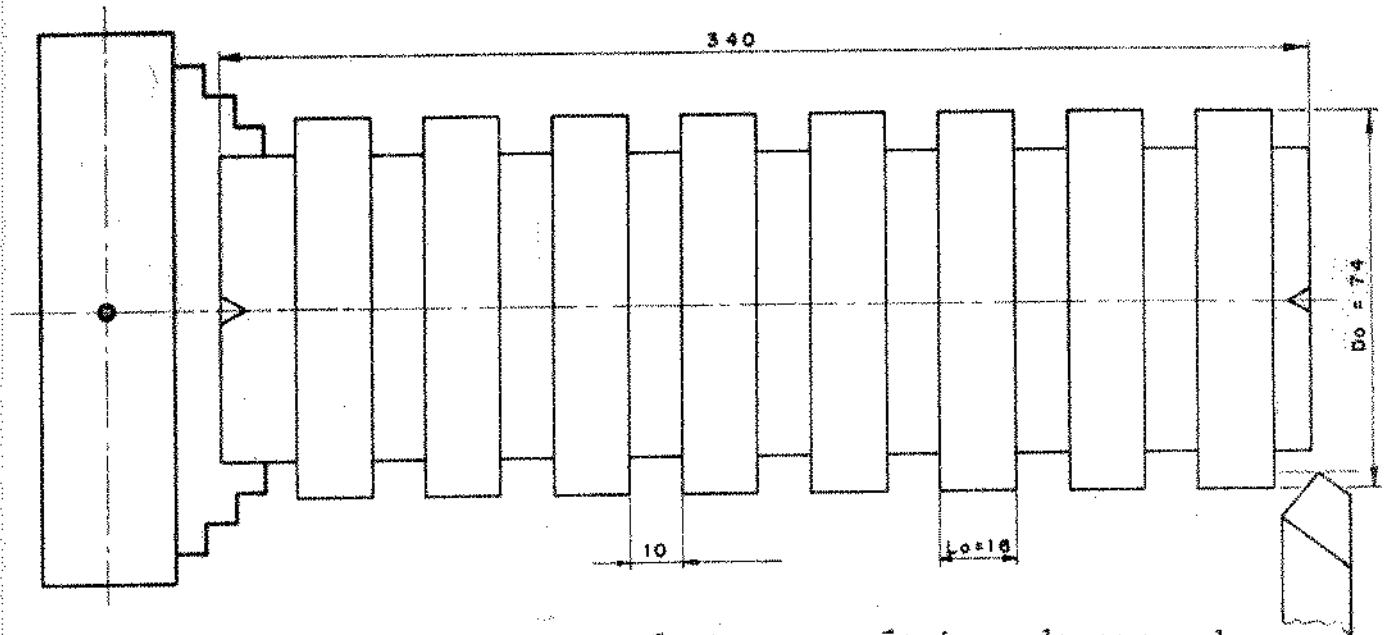


Fig. (20) Características geométricas do corpo de prova usado nos ensaios de usinabilidade.

Os ensaios foram realizados com ferramentas de aço rápido VK10N, com 10% de cobalto, indicadas para a usinagem de ferro fundido. Essas ferramentas foram fabricadas de uma mesma corrida (79265), conforme especificação da VILLARES. Sua composição química e geometria são apresentadas nas tabelas IX e X.

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	Co	Cu	P	S	Nb
1.15	.22	.32	4.22	.30	4.36	7.96	.78	9.88	.09	.025	.010	2.1

TABELA IX - Composição química das ferramentas usadas nos ensaios de usinabilidade.

$\alpha=8^{\circ}$	$\gamma=25^{\circ}$	$\chi=75^{\circ}$	$\epsilon=90^{\circ}$	$\lambda=0^{\circ}$	$R=0,8\text{mm}$
--------------------	---------------------	-------------------	-----------------------	---------------------	------------------

TABELA X - Geometria da ferramenta VK10N.

onde:

- α = ângulo de folga
 γ = ângulo de saída
 χ = ângulo de posição
 ϵ = ângulo de ponta
 λ = ângulo de inclinação
 R = raio de ponta

A velocidade de corte inicial do primeiro anel a ser usinado foi selecionada em ensaios preliminares, com o intuito de provocar destruição da ponta da ferramenta na usinagem do 6º, 7º ou 8º anel, e também, em função das rotações discretas, disponíveis, da máquina ferramenta.

Os ensaios de usinabilidade foram iniciados pela extremidade final de solidificação dos lingotes, eliminando-se cerca de 20 mm de cada extremidade.

O tempo de parada do torno para mudança de rotação entre dois anéis sucessivos foi cronometrado, e tomado igual a 1 minuto. Esse cuidado é bastante válido, pois, assim controlamos o esfriamento da ferramenta entre dois cortes consecutivos.

Durante os ensaios, foram adotadas as seguintes condições de usinagem:

Avanço	$a = 0,25 \text{ mm/volta}$	\varnothing periferia 80 mm
Profundidade	$P = 2,5 \text{ mm}$	\varnothing interior 74 mm
VELOCIDADE DE CORTE (m/min)		
Anel (nº)	Periferia	Interior
1	25,13	23,25
2	31,41	29,06
3	40,21	37,20
4	50,26	46,50
5	62,83	58,12
6	79,17	73,23
7	100,53	93,00

A velocidade de corte comparativa foi calculada de acordo com a referida norma, que fornece:

$$v_c = v_{n-1} + (v_n - v_{n-1}) \cdot L/L_o$$

onde:

v_c = velocidade de corte comparativa

v_{n-1} = velocidade de corte do anel usinado imediatamente vizinho ao anel que provocou a queima da ferramenta

v_n = velocidade de corte do anel usinado onde ocorreu a queima da ferramenta

l_o = comprimento de cada anel, $L_o = 16$ mm

l = comprimento do anel usinado onde ocorreu a queima da ferramenta.

O índice de usinabilidade (I.U) de cada material foi calculado de acordo com a expressão:

$$I.U. = \frac{v_{ce}}{v_{cp}} \cdot 100 \quad \begin{array}{l} \text{(velocidade comparativa do metal ensaiado)} \\ \text{(velocidade comparativa do metal padrão)} \end{array}$$

As tabelas I.1 e I.2 apresentam os resultados desse ensaio, (Apêndice I)

4.2.2 - Procedimento dos ensaios de usinabilidade no método do torneamento de faceamento.

Nesse caso, foi utilizado o método de faceamento de Mathon, enunciado no item 2.4.2.2.

Os corpos de prova foram obtidos da seção transversal, central, dos lingotes brutos de fundição, apresentando as seguintes dimensões: largura: 40 mm, diâmetro externo: 65 mm, diâmetro do furo: 6 mm.

A figura 21 ilustra esquematicamente a forma geométrica do corpo de prova.

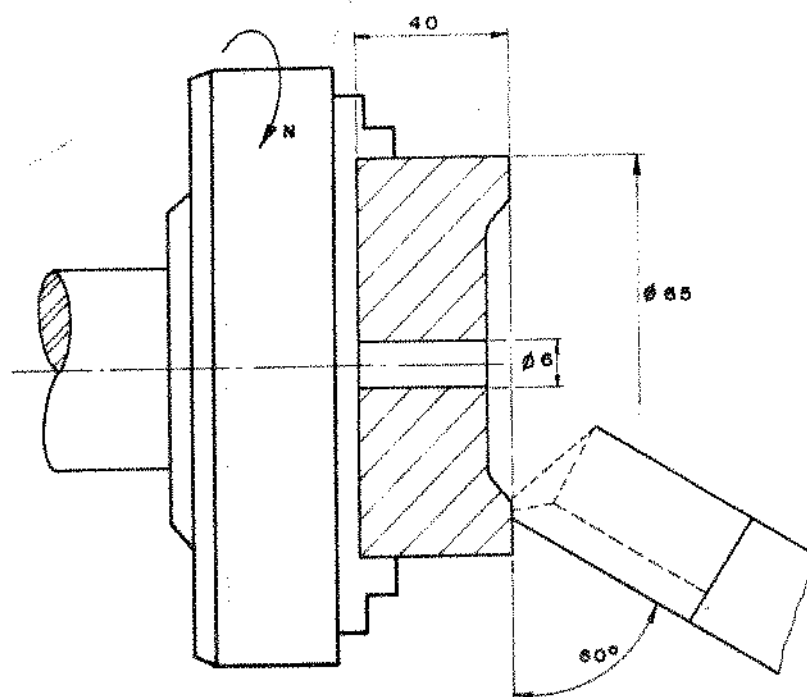


Fig. (21) Características geométricas do corpo de prova usado nos ensaios na operação de faceamento.

Antes de se iniciar os ensaios de usinabilidade, os corpos de prova foram faceados com profundidade de corte e avanço muito pequenos, conseguindo-se desse modo uma superfície plana com bom acabamento, paralela ao plano de deslocamento do carro transversal.

As rotações e o avanço foram selecionados em ensaios preliminares, com o objetivo de se conseguir a destruição da aresta cortante da ferramenta, respeitando as dimensões do corpo de prova. Era indispensável também, que essa destruição da aresta cortante ocorresse de forma gradativa, formando um perfil quase linear, podendo-se assim medir o desgaste da ferramenta correspondente a 0,2 mm.

A tabela XI apresenta as condições de usinagem utilizadas:

Avanço:	$a = 0,021 \text{ mm/volta}$
Profundidade:	$P = 1,0 \text{ mm}$
Rotações (rpm):	515, 590, 660, 750 e 850 rpm

TABELA XI - Condições de usinagem na operação de faceamento.

Os ensaios de usinabilidade foram repetidos três vezes para cada rotação selecionada, conservando-se sempre a mesma profundidade de corte e avanço.

Após cada ensaio, o perfil usinado do corpo de prova foi medido com o auxílio de um relógio comparador, com resolução de 0,01 mm, acoplado ao próprio carro do torno. Para se verificar a correspondência entre o diâmetro usinado $D_{0,2}$ e o fim de vida da ferramenta, foi também medido o diâmetro usinado correspondente à queima da ferramenta D_w , e o tempo efetivo de corte (vida da ferramenta). As tabelas do Apêndice II apresentam os resultados.

Através da regressão linear, foi calculado o coeficiente angular de cada reta, o coeficiente de correlação r , e o diâmetro usinado $D_{0,2}$ para uma rotação de 350 rpm (conforme os dados fornecidos pelos gráficos $D_{0,2} \times N$) (veja tabelas II.1 a II.5). A necessidade de se calcular $D_{0,2}$ para uma rotação de 350 rpm, deve-se ao fato de que, alguns estudiosos no assunto acreditam que exista certa correspondência entre a velocidade de corte para uma vida de 60 minutos em ensaios de longa duração e o diâmetro $D_{0,2}$ para uma rotação de 350 rpm. Essa rotação de 350 rpm não foi usada diretamente nos ensaios de faceamento, tendo em vista a ausência da destruição da aresta cortante da ferramenta, a despeito das dimensões limitadas dos corpos de prova utilizados.

As ferramentas foram confeccionadas seguindo-se as recomendações geométricas da norma experimental.

A figura 22 apresenta as características geométricas das ferramentas usadas nos ensaios.

O índice de usinabilidade (I.U.) de cada material foi calculado de acordo com a expressão:

$$I.U. = \frac{D_{0,2}^e (350)}{D_{0,2}^p (350)} \cdot 100$$

onde:

$D_{0,2}^e (350)$ = diâmetro usinado do material ensaiado, para um desgaste de 0,2 mm da ferramenta, com uma rotação de 350 rpm.

$D_{0,2}^p (350)$ = diâmetro usinado do material padrão, para um desgaste de 0,2 mm da ferramenta, com uma rotação de 350 rpm.

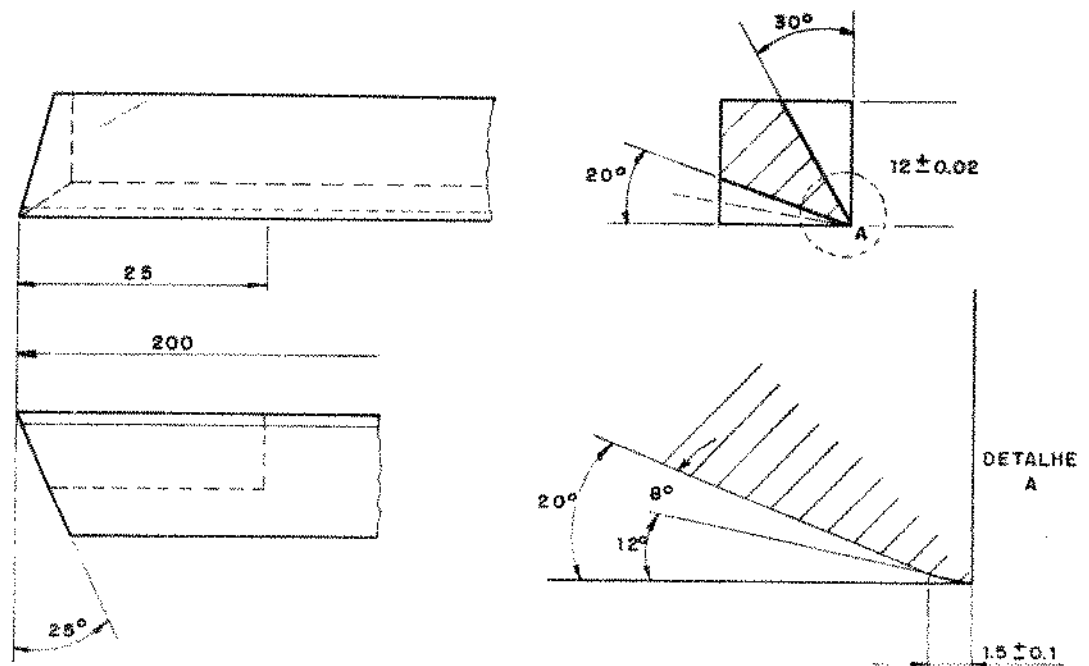


Figura (22) Geometria da ferramenta usada nos ensaios de usinabilidade na operação de faceamento.

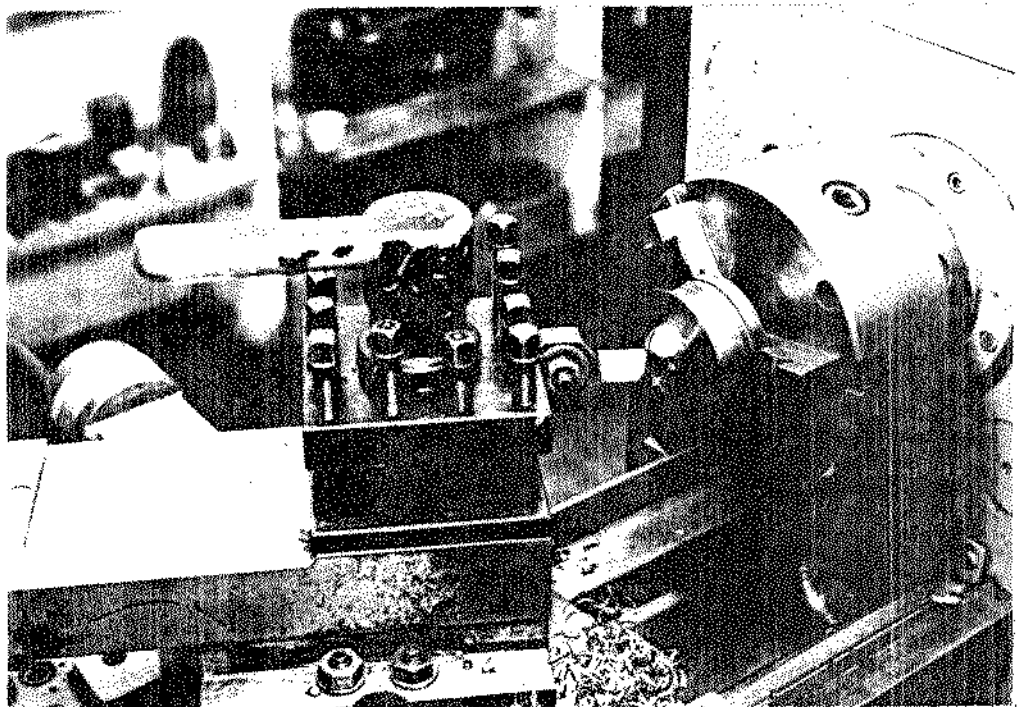


Figura (23) Corpo de prova e ferramenta após o ensaio de usinabilidade na operação de faceamento.

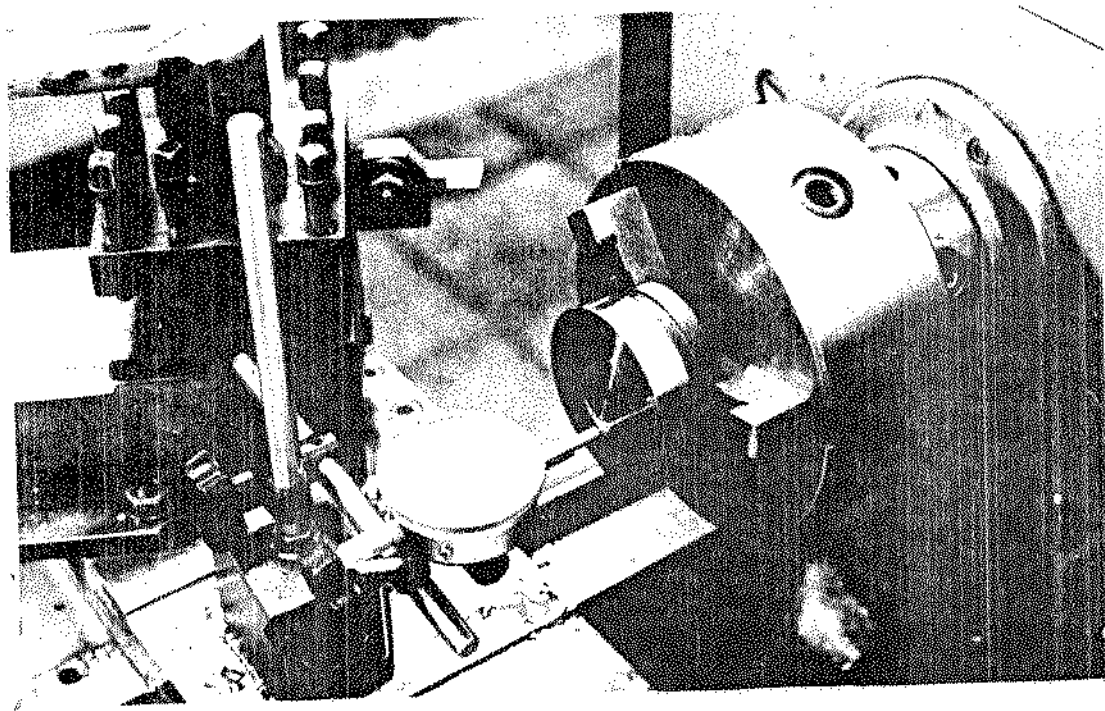


Figura (24) Medição do diâmetro usinado $D_{0,2}$ após o ensaio de usinabilidade na operação de faceamento.

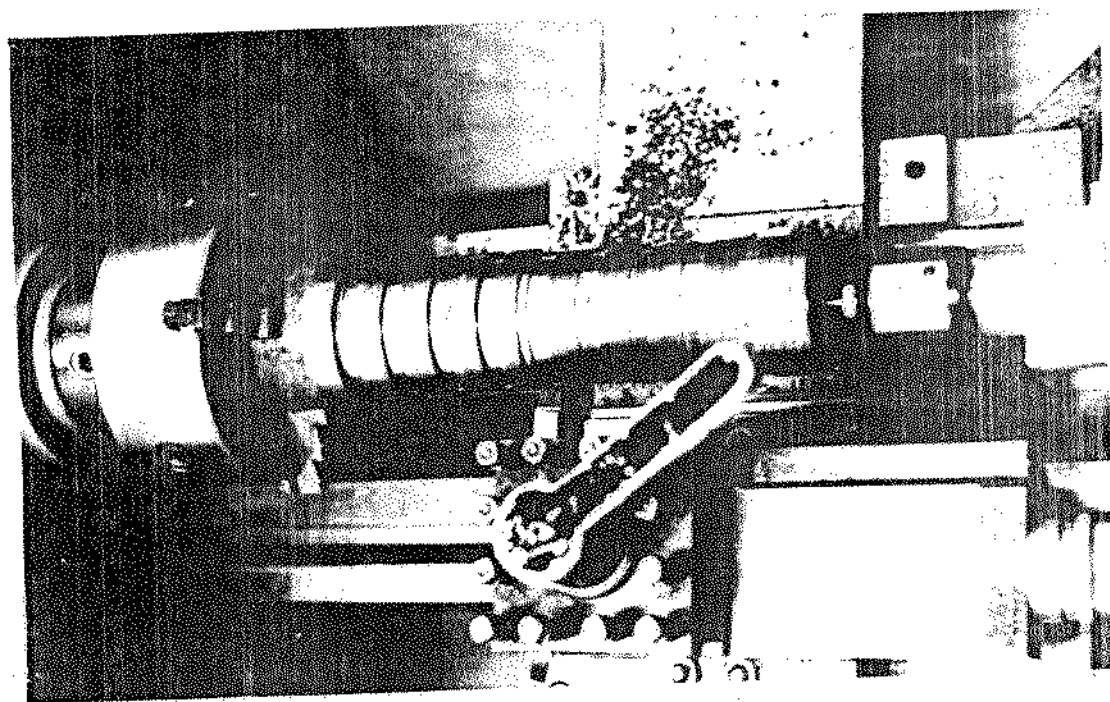


Figura (25) Corpo de prova e ferramenta após o ensaio de usinabilidade na operação de torneamento cilíndrico.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 - RESULTADOS OBTIDOS NO MÉTODO DO TORNEAMENTO CILÍNDRICO

As tabelas e figuras do Apêndice I apresentam os resultados dos ensaios de usinabilidade na operação de torneamento cilíndrico, e sua correspondência com a dureza Brinell, para os três tipos de materiais processados em moldes de quartzo e granalha, com variações dos modelos convencional e de poliestireno expandido.

Os resultados experimentais mostraram um aumento crescente no índice de usinabilidade dos três ferros fundidos ensaiados na seguinte ordem: FE 6002, FC 25 e FE 4212 respectivamente (figuras I.5, I.6, I.7 e I.8). Dentre estes, o único que apresentou maior índice de usinabilidade com relação ao material tomado como padrão (o FC 20 processado por fundição contínua em coquilha de grafite) foi o FE 4212, com exceção daquele fundido em molde de granalha com modelo convencional (Figuras I.1 e I.2).

Observa-se que, fixado o molde de quartzo e variando-se o material do modelo, não houve variação sensível nem na usinabilidade e nem na dureza Brinell resultantes, para um mesmo material (figuras I.1 e I.9). Todavia observa-se que houve uma redução de aproximadamente 15% na usinabilidade da periferia do fundido quando se compara com a usinabilidade do seu interior (figura I.1).

Fixado o molde de granalha e variando-se o material do modelo, houve pequena variação na usinabilidade e na dureza Brinell devido à mudança do modelo convencional para poliestireno expandido, todavia não significativa (figuras I.2 e I.10). Nesse caso, a usinabilidade da camada interior com relação a periferia apresentou um comportamento semelhante ao caso do molde de quartzo, exceto para o FE 4212 que, de maneira surpreendente apresentou praticamente os mesmos índices de usinabilidade (figura I.2).

Observa-se ainda que, no caso de fixação de um modelo com mudança do material de molde, houve variação sensível na usi-

nabilidade e dureza Brinell, pois, para o molde de quartzo um maior índice de usinabilidade e uma menor dureza foi encontrado com relação aos fundidos em molde de granalha (figuras I.3, I.4, I.11 e I.12).

A figura I.17 apresenta os resultados do índice de usinabilidade em função da dureza Brinell, para todos os metais ensaiados. Percebe-se que o aumento do índice de usinabilidade em correspondência com a queda da dureza Brinell é mais acentuada quando se trabalha com o mesmo material (perceber o comportamento do FC 25 comparado com os ferros FE 4212 e FE 6002). Em termos comparativos, o FC 25 tem menor dureza Brinell do que o FE 4212 e também menor I.U. Este fato mostra que nem sempre a usinabilidade de um metal melhora com o decréscimo de sua dureza.

5.2. RESULTADOS OBTIDOS NO MÉTODO DO TORNEAMENTO DE FACEAMENTO

É prática comum representar o parâmetro que indica o fim de vida da ferramenta em função da velocidade através de um modelo matemático. Para o caso da operação de faceamento segundo Matheron, temos:

$$K = D_{0,2} \cdot N^m$$

$$\lg K = \lg D_{0,2} + m \lg N$$

onde:

$D_{0,2}$ = diâmetro usinado até a medida do desgaste de 0,2 mm da ferramenta.

m = coeficiente angular da reta em coordenadas dilogarítmicas.

N = velocidade de rotação (R.P.M.)

K = constante

Os coeficientes $D_{0,2}$, m e $\lg k$ são apresentados na tabela II.5.

As figuras II.1 a II.8 (Apêndice II) apresentam os resultados experimentais do diâmetro usinado ($D_{0,2}$) em função da velocidade de rotação (N) em coordenadas dilogarítmicas, para os três tipos de materiais processados em moldes de quartzo e granalha com modelos de poliestireno expandido e convencional.

Conclui-se que: em termos de ordem crescente de usinabilidade, o mais usinável foi o FC 25, seguido dos FE 4212 e FE 6002 (figuras II.5 a II.8). O ferro fundido cinzento FC 20 tomado como padrão, apresentou o maior índice de usinabilidade com relação aos demais materiais.

Observa-se que, fixado o molde de quartzo e variando-se o tipo de modelação, não houve variação sensível na usinabilidade resultante para um mesmo material. Entretanto, percebe-se um pequeno aumento no I.U. nos materiais fundidos com modelo de poliestireno expandido, exceto para o FE 4212. Nesse caso, as inclinações das retas que determinam seus coeficientes angulares apresentaram-se bastante coerentes entre si (figura II.1).

Fixado o molde de granalha e variando-se o tipo de modelação (figura II.2) os materiais FE 4212 e FE 6002 apresentaram praticamente a mesma usinabilidade. A variação devida ao tipo de modelação foi insignificante, exceto para o FE 4212 fundido com modelo de poliestireno expandido, que, em baixa rotação (515 rpm) apresentou uma redução de $D_{0,2}$ significativa, comparado com o mesmo material fundido com modelo convencional. Nesse caso, as inclinações das retas apresentaram coeficientes angulares distintos entre si, com exceção do FE 6002.

No caso de fixação de um modelo com mudança de material do molde, houve variação sensível na usinabilidade, pois, para os metais processados em molde de granalha um maior índice de usinabilidade foi encontrado, com relação aos fundidos em molde de quartzo (figuras II.3 e II.4). Com relação as inclinações das retas, os metais apresentaram boa correspondência de seus coeficientes angulares, com exceção novamente do ferro fundido FE 4212 processado com modelo de poliestireno expandido (figura II.4).

A figura II.9 apresenta os resultados dos ensaios de usinabilidade na operação de faceamento em função da dureza Brinell para todos os metais ensaiados. Apesar da escassez de correlação entre a queda de dureza com um conseqüente aumento do índice de usinabilidade, nota-se que, para um mesmo metal processado com um certo tipo de molde, há uma tendência de conservar uma relação inversa da queda da dureza Brinell com o aumento do I.U. (exemplo: o FE 6002, processado em molde de quartzo, com variação do material do modelo).

5.3 - RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE OS DOIS CRITÉRIOS DE ENSAIOS ADOTADOS

As figuras III.1 a III.8 (Apêndice III) apresentam a comparação entre os índices de usinabilidade baseado no método do torneamento cilíndrico com o do torneamento de faceamento para cada caso particular.

A determinação dos índices de usinabilidade já foi comentada no item 4.2.

- a) Caso da fixação do molde de quartzo com mudança do material do modelo (figura III.1).

Nas operações de torneamento e de faceamento, o ferro FE 6002 apresentou praticamente o mesmo I.U. (cerca de 50%). Por sua vez, o ferro FC 25 apresentou índice de usinabilidade maior em ambas as operações de usinagem (cerca de 90%). Ao contrário dos casos anteriores, o ferro FE 4212 apresentou comportamento surpreendente: na operação de torneamento cilíndrico o I. U. foi de 105% aproximadamente, enquanto que, na operação de faceamento este índice caiu para 40% aproximadamente, tanto para o modelo de poliestireno expandido como para o modelo convencional.

- b) Caso da fixação do molde de granalha com mudança do material do modelo (figura III.2)

Na operação de torneamento, o ferro FE 6002 apresentou um índice de usinabilidade em torno de 40%, enquanto que, no faceamento este índice foi de 55%. Por sua vez, o ferro FC 25 apresentou um I.U. de 80% na operação de torneamento, e cerca de 90% no faceamento. Novamente percebe-se a divergência dos valores encontrados para o FE 4212: na operação de torneamento o índice de usinabilidade foi de 100%, e de 50% aproximadamente na operação de faceamento.

Do exposto, conclui-se que a mudança do processo de modelação foi praticamente insignificante, tanto na operação de torneamento bem como na operação de faceamento.

Nota-se uma pequena variação dos valores encontrados devido aos critérios de ensaios de usinabilidade adotados. Essa diferença foi bastante acentuada no ferro FE 4212.

- c) Caso da fixação de um modelo com mudança do material de molde (figuras III.3 e III.4).

Em todos os casos em que foi fixado o modelo convencional com variação do material de molde, os fundidos em molde de quartzo apresentaram melhor índice de usinabilidade ($\Delta I.U. \approx 10\%$) na operação de torneamento. Enquanto que, na operação de faceamento os fundidos em molde de granalha apresentaram I.U. maior ($\Delta I.U. \approx 12\%$, figura III.3).

De maneira semelhante aconteceu quando foi fixado o modelo de poliestireno expandido: na operação de torneamento, os fundidos em molde de quartzo apresentaram maior I.U. ($\Delta I.U. \approx 10\%$) enquanto que, na operação de faceamento os fundidos em molde de granalha apresentaram melhor I.U. ($\Delta I.U. \approx 7\%$, figura III.4).

Conclui-se portanto, que a mudança do material de molde é mais significativa do que a mudança do material do modelo, em ambos os métodos de ensaio de usinabilidade.

A tabela III.1 e a figura III.9 ilustram global a correlação existente entre os dois critérios de usinabilidade adotados para todos os metais ensaiados.

5.4 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Considerando-se a influência que a microestrutura exerce sobre a usinabilidade de ferros fundidos, os seguintes fatos permitem que sejam discutidos:

Os ensaios de usinabilidade baseado no método do torneamento cilíndrico mostraram que, de maneira geral a usinabilidade da periferia dos ferros fundidos apresentou-se consideravelmente mais baixa do que o seu interior. Para o caso dos metais processados em moldes de quartzo, a literatura aponta a crosta do fundido como sendo constituída de uma camada superficial muito fina, onde o metal vazado reage quimicamente com o material de molde tornando-a abrasiva, o que causa considerável desgaste da ferramenta [2]. Tal crosta é possivelmente rica em SiO_2 [4] (veja figuras IV.1 a IV.20, Apêndice IV). Para o caso dos metais processados em moldes de granalha, entretanto, não se tem a presença

de crosta rica em SiO_2 . Por esta razão era de se esperar índices de usinabilidade próximos tanto no interior como na periferia dos fundidos. Se tal fato não ocorreu na sua íntegra, observa-se por comparação das figuras I.1 e I.2 que a variação dos índices de usinabilidade foi menor para o caso do molde de granalha. Dois fatores podem ser apontados como responsáveis por tal ocorrência: o primeiro seria a presença de óxidos naturalmente formados na periferia da peça pela presença de oxigênio no espaço intergranular do material do molde, e o segundo poderia ser atribuído a zonas pobres e fragmentadas de grafita na periferia, as quais aumentam o desgaste da ferramenta devido a ausência de lubrificante sólido durante a operação de usinagem [2] (veja figuras IV.1 a IV.20)

O ferro fundido nodular FE 4212 possui uma matriz predominantemente ferrítica que contribui para uma boa usinabilidade [33, 17], enquanto que os ferros FC 25 e FE 6002 possuem matriz perlítica cujas características dão menor usinabilidade [17] (figuras IV.5 - IV.25 Apêndice IV). Este fato poderia justificar o comportamento das figuras analisadas referentes aos resultados dos ensaios de usinabilidade na operação de torneamento cilíndrico, onde o FE 4212 apresentou maior índice de usinabilidade com relação aos ferros FE 6002 e FC 25 (figura III.9). Entretanto, a contradição surge quando analisamos os resultados encontrados na operação de faceamento. Nesse caso, a usinabilidade do ferro FE 4212 assume valores bastante reduzidos, como podemos apreciar pela figura III.9. Para justificar a queda do I.U. na operação de faceamento, algumas hipóteses podem ser aventadas:

- Os ensaios metalográficos revelaram que o ferro fundido nodular FE 4212 apresentou uma estrutura constituída de porosidades no interior do lingote (figura IV. 1). Esse fenômeno poderia ter ocorrido tendo em vista a diminuição da velocidade de solidificação da periferia para o centro da peça, com tendência de que os gases e a contração volumétrica ficassem mais concentradas na parte central da peça [38], originando daí porosidades que provocariam cortes descontínuos na usinagem, prejudicando a vida da ferramenta. Foi constatado também, que uma maior proporção de steadita se concentrava no interior do ferro FE 4212, com micro-dureza da ordem de 1000 HV. Para se ter uma idéia da influência desse micro-constituente, as figuras IV. 5 e IV. 7 apresentam as medidas da impressão de micro-dureza nas regiões ferrítica, perlítica e de steadita. Conclui-se naturalmente, que a presença da

steadita é um fator que acelera o desgaste da ferramenta de corte devido a sua elevada dureza, como cita Field [33].

- O efeito do cobre é de produzir uma estrutura com dureza homogênea pela eliminação de "pontos moles" (ferrita livre) e "pontos duros" (cementita livre) aumentando a vida da ferramenta, segundo Albert e Eeghem [47, 56]. Sendo assim, a ausência desse elemento químico pode resultar em uma estrutura de núcleo heterogêneo, favorecendo um desgaste prematuro da ferramenta de corte, reduzindo portanto a usinabilidade do ferro FE 4212 na operação de faceamento, uma vez que o mesmo não contém nenhum teor de cobre. Tal fato não aconteceria no ferro FE 6002, que contém 0,6% Cu.

Na operação de torneamento cilíndrico, os metais fundidos em moldes de quartzo apresentaram índice de usinabilidade maior do que aqueles fundidos em moldes de granalha. Esse comportamento poderia ser atribuído a velocidade de solidificação que é maior nos fundidos em moldes de granalha, formando veios ou nódulos de grafita menores, apresentando também maior dureza Brinell, com maior quantidade de carbonetos (Fe_3C) comparados com os fundidos em moldes de quartzo. Esta hipótese estaria compatível com os resultados conseguidos para os ferros fundidos apontados na literatura [38, 10]. Os resultados que permitiram tal análise podem ser apreciadas pelas figuras IV.1 a IV.20 e a tabela VIII. Entretanto, na operação de torneamento de faceamento, os metais fundidos em moldes de quartzo apresentaram índice de usinabilidade menor do que os metais fundidos em moldes de granalha. A tentativa de justificar esse fenômeno através da correlação entre as propriedades estruturais e mecânica (dureza) dos ferros fundidos seria contraproducente, pois acabamos de afirmar que existe uma coerência lógica dos resultados conseguidos na operação de torneamento cilíndrico.

Este fato nos leva a acreditar, portanto, que o processo de usinagem entre os dois critérios adotados não é o mesmo. Esta diferença é devida principalmente às seguintes razões: [6]

- A deformação do cavaco na operação de faceamento, do centro para a periferia da peça, não é a mesma de uma operação de torneamento cilíndrico, pois o ângulo de cisalhamento é menor, o grau de recalque R_c é maior e varia com o diâmetro de faceamento

(figura 26).

- Devido à variação contínua de velocidade e ao aumento do grau de recalque, o comportamento térmico desta operação de faceamento difere de uma operação de torneamento cilíndrico, em consequência, a vida da ferramenta não será a mesma. Como já foi visto, a destruição da aresta cortante das ferramentas de aço rápido está intimamente relacionada com a temperatura de corte [6].

- Considerando-se que a estrutura bruta de metais fundidos variam com a distância da parede do molde podendo apresentar gradientes significativos das propriedades mecânicas e estruturais, é de se esperar que, na operação de faceamento o desgaste da ferramenta de corte varie em função das propriedades estruturais do ferro fundido (variação da distribuição, forma e tamanho das lamelas de grafita, por exemplo). Tal variação não ocorre na operação de torneamento cilíndrico.

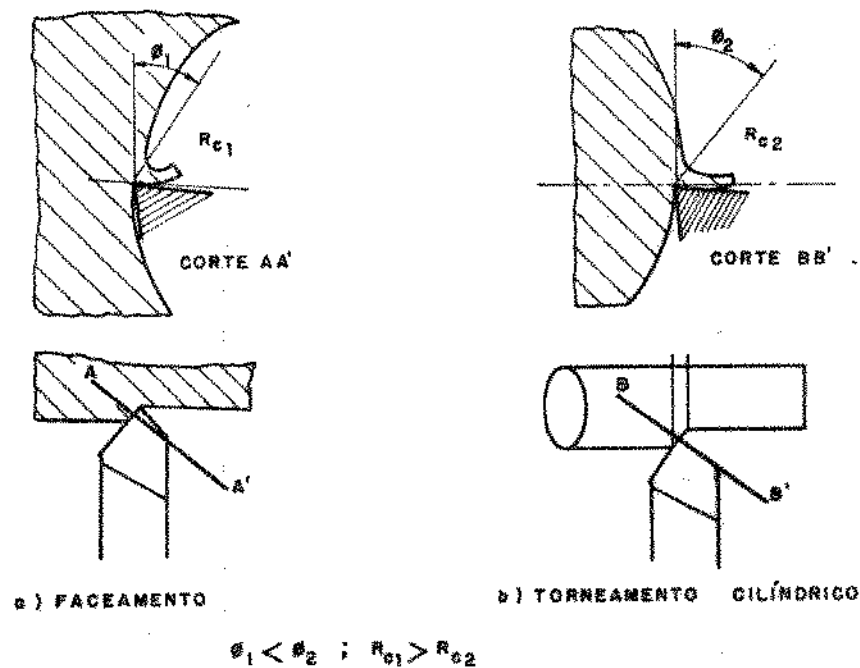


Fig. (26) Diferença entre o processo de formação do cavaco na operação de faceamento do centro para a periferia e na operação normal de torneamento cilíndrico.

Apesar desses comentários, alguns pesquisadores acreditam que exista certa correlação entre o ensaio de usinabilidade na operação de faceamento para uma rotação de 350 rpm, com os ensaios de usinabilidade de longa duração baseado na velocidade de corte V_{60} com ferramentas de aço rápido, segundo Mathon [31]. É importante salientar que, nesses ensaios, a usinagem foi realizada em aços [32]. Bedrin e Roumesy [32] mediram a força eletromotriz nos ensaios de faceamento segundo Mathon, em vários materiais. Infelizmente os resultados obtidos com ferro fundido cinzento não exibiram uma boa reprodutibilidade como no caso dos aços devido a imprecisão da máxima força eletromotriz. Em ensaios posteriores [57], esses autores encontraram certa correlação entre os ensaios de faceamento segundo Mathon e de torneamento cilíndrico com velocidade de corte contínua, em ferros maleáveis. Usando também como parâmetro de comparação a medida da força eletromotriz. Resta lembrar, entretanto, que, em ambos os critérios de ensaios foram mantidos constantes a ferramenta, sua geometria e todas as condições de usinagem.

Os resultados discutidos trazem informações que permitem comentar sobre uma correlação maior que poderia ter havido entre os dois critérios adotados, ou seja, alguma divergência entre os dois critérios de ensaio poderia ter sido atribuída também as seguintes causas:

- A influência do tipo de ferramenta de aço rápido utilizada: os ensaios de torneamento cilíndrico foram realizados com ferramentas de aço rápido fornecida pela VILLARES, e os ensaios de faceamento foram realizados com ferramentas de aço rápido fornecida pela Siderurgia N. S. Aparecida - S.P.

- A adesão na superfície de folga (adesão de flanco) e à aresta postíça de corte. Fenômenos típicos de materiais com microestruturas ferríticas e de baixa dureza (é o caso do ferro FE 4212). A adesão de flanco e arestas postíça de corte são resultantes de pequenas partículas que se destacam do cavaco e aderem a ferramenta [27].

- As características geométricas das ferramentas, e as condições de usinagem, que são diferentes nos dois métodos de ensaio, principalmente a influência da velocidade de corte.

No que diz respeito a comparação entre os ensaios de usinabilidade de longa duração baseado na velocidade de corte V_{60} com ferramenta de aço rápido e os ensaios do aumento progressivo da velocidade de corte no torneamento cilíndrico, existe boa correlação entre esses dois critérios de ensaio, segundo Micheletti [24], Roumesy [12] e Ferraresi [6].

Dos resultados discutidos no presente trabalho, percebe-se certa correlação entre os ensaios de usinabilidade baseado no método do torneamento cilíndrico com a microestrutura e dureza Brinell dos ferros fundidos conseguidos na literatura. Este fato nos leva a acreditar que o método de torneamento cilíndrico avalie melhor a usinabilidade dos metais ensaiados.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

- Variações consideráveis foram obtidas no índice de usinabilidade dos três metais ensaiados, apresentando-se como o mais usinável o ferro FE 4212, seguido do FC 25 e por último o FE 6002, na operação de torneamento cilíndrico.

- A superfície externa dos materiais apresentaram uma redução na usinabilidade em torno de 15% com relação a usinabilidade no interior dos corpos de prova, independentemente do processo de fundição utilizado.

- A variação devida ao material de molde apresentou-se mais sensível na mudança da dureza Brinell e usinabilidade do que a variação devida ao processo de modelação, em ambos os critérios de ensaios de usinabilidade adotados.

- Os resultados obtidos no presente trabalho mostraram que a utilização de modelos de poliestireno expandido nas fundições não alteraram a usinabilidade e dureza dos ferros fundidos, apesar de apresentarem vantagens técnicas e econômicas apontados na literatura.

- Verificou-se a correspondência entre as propriedades estruturais e mecânica (dureza) com a usinabilidade dos metais ensaiados, na operação de torneamento cilíndrico.

- A dureza Brinell nem sempre diminui com o aumento da usinabilidade quando se considera materiais distintos.

- Os ferros fundidos em molde de granalha apresentaram maior dureza e menor usinabilidade comparados com aqueles fundidos em moldes de quartzo, na operação de torneamento cilíndrico.

CAPÍTULO 7

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Determinar para os mesmos materiais e processo de fundição, maior número de dados referentes a outros avanços, profundidade e velocidade de corte, procurando otimizar as condições de corte.

- Realizar ensaios de longa duração com ferramentas de metal duro e cerâmica, determinando a velocidade de corte V_{60} , procurando relacionar os resultados com os obtidos neste trabalho.

- Pesquisar os efeitos da temperatura e força de corte sobre a usinabilidade dos metais em estudo. Correlacionar os resultados com os obtidos neste trabalho.

- Verificar a influência de vários tipos de recobrimento de molde sobre a usinabilidade da periferia para os mesmos materiais, repetindo o processo de fundição utilizado.

BIBLIOGRAFIA

- [1] BILONI, H. - Estado atual da pesquisa na área da solidificação de metais e ligas. R. Metalurgia, São Paulo, 26(155) 803-823, Out. 1970.
- [2] EL-SALAMONI, M.A. - Effect of the mould moisture content on the nature of the casting skin and the machinability of gray iron castings. Pag. 128.
- [3] HOFF, O. and ANDERSEN, P. - 35th International Foundry Congress, Kyoto, Oct. 1968, paper 8.
- [4] MINORU, NISHINA, KENJI e HARADA, YASUO - On Tool Wear in Cutting Black Skin of Cast Iron. Japan Soc. of Pree. Engg. vol. 8, n° 4, Dec. 1971, Pag. 2.
- [5] LEIBHOLZ, RODOLFO e HENRIQUE - Contribuição Técnica apresentada na 1^a Conferência Sobre Tecnologia de Fundição, dezembro de 1980, Pag. 1.
- [6] FERRARESI, D. - Fundamentos da usinagem dos metais - Vol. I. 1977, Editora Edgard Blücher Ltda. S.P.
- [7] TOBIAS, S.A., DAS, M.K. - The basis of a universal machinability index department of Mechanical Engineering, University of Birmingham - Proc. Int. M.T.D.R. Conf. (1964).
- [8] DATSKO, J. - "Machinability index material properties and manufacturing processes. John Wiley e Sons, Inc. Pag. 444.
- [9] PARENT SIMONIN, SIMONE - Measure de L'usinabilité des Metaux, Fonderie 356, Mai 1976. Vol. 31.
- [10] FORTINO, D. - Machinability of Iron Castings, Foundry Trade Journal - December, 1962, Pag. 729.

- [11] SHARAN, R.; VARMA, M.P. - Influence of Minor Additions of some Elements on Machinability and Mechanical Properties of Cast Iron. Pag. 1 - Indian Foundry Journal, December, 1975.
- [12] ROUMESY, R. - Les essais accélérés en tournage - pag. 151 Machine Outil, n° 333. Aout-Sep., 1976.
- [13] ROBELET, M.; ODIN, G. - Étude comparée de deux tests rapides d'usinabilité corrélation avec les résultats d'essais de longue durée - Revue de Métallurgie - Décembre 1973 - pag. 1021.
- [14] MURPHY, D.W. - Machinability of Steels - Bethlehem Steel Company Bethlehem. Penna - Pag. 177 - Trans. A.S.M.E.
- [15] DWYER, J.J. - "Cutting Fluids" - American Machinist, New York, 16:105-120, Março, 1964.
- [16] CUNHA, L.B. - Efeito da Variação da Microestrutura dos Aços nos Parâmetros de Corte - Tese de Mestrado - Agosto, 1976. Florianópolis, S.C.
- [17] Effect of Microstructure on Machinability of Ferrous Castings - Casting Engineering, Spring 1979, pag. 17.
- [18] BARROW, G. - Tool Life Equations and Machining Economics, Division of Machine Tool Engineering, Department of Mechanical Engineering, UMIST.
- [19] BOOTHROYD, G. - Fundamentals of Metals Machining. Ed. Edward Arnold - Londres, 1965.
- [20] FIELD, M. e KAHLE, J.F. - Definition de L'usinabilité , B.D.T. n° 30, Usinabilité des Fontes, octobre, 1963.
- [21] VIEREGGE, G. - Facteurs de Coupe, B.D.T. n° 30, Usinabilité des Fontes, octobre, 1963.

- [22] CHAIRMAN, H. W.; GRUER, A.W.; CURRY, T.W. - Gray and Ductile IRON CASTING HANDBOOK - Edited by Charles F. Walton, 1971, Cleveland.
- [23] MICHELETTI, G.F. - Tecnologia Mecânica - Il Taglio Dei Metali, Vol. 1 - Seconda Edizione - UTET.
- [24] MICHELETTI, G.F. - Work on Machinability in the Cooperative Group C of CIRP and Outside this Group.
Annals of the C.I.R.P. - vol. XVIII - pag. 13-30 - Printed in Great Britain, 1970.
- [25] ARMARREGO, E.J.A. e BRAWN - The Machining of Metals - Printice Hall - 1969.
- [26] MICHELETTI, G.F.; IPPOLITO, R. - Experimental Analysis of the Correlation Between Cutting Forces Variation with Time and cutting data - 14º I.M.T.R., 1973.
- [27] QUEIROZ, A.A. - Usinabilidade do ferro fundido cinzento e avaliação da temperatura e força de corte como sensores de desgaste - Tese de Mestrado - Florianópolis - SC.
- [28] ESTON, N.E. - Acabamento de superfície e conversão de escalas de rugosidade - Metalurgia - ABM, São Paulo, 116, julho 1967.
- [29] TAKEYAMA, H. e MURATA, R. - "Basic Investigation of Tool Wear" Trans. A.S.M.E., Série B - Journal of Engineering for Industry, 85:33:38, Fev. 1963. Vol.85.
- [30] SHARAN, R.; SINHA, D.N. - Effects of Niobium Additions on the Machinability, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Grey Malleable cast Irons - Trans. of the Indian Institute of Metals - June, 1969 - Vol. 22, Pag. 47.
- [31] MATHON, R. GRECIET, M. - Usinage des Fontes et Alliages: Quels Criteres Retenir? - Hommes et Fonderie - Juin-Jillet, 1976, Pag. 9.

- [32] SIMONIN, S. P. - Determination of the Machinability of Metal-leable Irons by Renaut-Mathon Method. AFS Transactions, Vol. 84, 1976, pag. 471.
- [33] FIELD, M.; STANSBURY, E.E. - Effect of Microstructure on Machinability of Cast Irons - Part I and II - Trans. American Society of Mechanical Eng., 1947, Págs. 665 e 675, vol. 69.
- [34] MURRY, G. - Participation de la Siderurgie Francaise au Choix des Methodes de Controle de L'usinabilite par Tournage et a la preparation de la Norme A03-654. OTUA: Technique pour L'utilisation de L'acier - Février 1975.
- [35] FILIPPI, A. de - Analysis and Porposal for time Machinability Tests - Influence of Metallurgy on Machinability - pag. 396.
- [36] Methodes de Controle de L'usinabilité par tournage des aciers destines au decolletage et des aciers de construction a l'aide d'outils en acier rapide - Norme Experimentale - A03-654. Aout, 1975 - Editée par L'association Francis de Normalisation (AFNOR)
- [37] BRODY, H.; FLEMINGS, M.C. - Solute Redistribution in Dendritic Solidification. Trans. Met. Soc. A.I.M.E., 236: 615, 1966.
- [38] KONDIC, V. - Princípios Metalúrgicos de Fundição - Traduzido por Cláudio Luiz, Polígono, Ed. da Universidade de São Paulo, 1973.
- [39] CZAPLICK, L. - L'usinabilite et la coupe des m^etaux. Rev. Soc. Belge Ingénieurs Ind. n° 12, 1962.
- [40] PRATES, M. & DAVIES, G.J. - Solidificação e Fundição dos Metais e suas ligas - Ed. U.S.P., 1978.
- [41] CHIAVERINI, V. - Aços e Ferros Fundidos, ABM, 4^a Edição - S.P. 1977.

- [42] MARGERIE, J.C. - Facteurs Métallurgiques de L'usinabilité des pièces en Fonte - Fonderie 303, Juillet - 1971, pag. 251.
- [43] LORIA, E.A. - Machinability and Microstructure of Cast Irons Trans. AFS. Vol. 62 - 1954, pag. 163.
- [44] BRANCO, H.C.C. e SANTOS, A.B.S. - Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares, 1ª Edição, I.P.T., São Paulo, 1977.
- [45] BATTY, A.R. - Machinability of Cast Iron Surfaces, Castings, February, 1970.
- [46] ANGUS, H.T. - Physical and Engineering Properties of Cast Iron, B.D.T., Usinabilité des Fontes, octobre, 1963.
- [47] De SY, A., EEGHEM, L. V. - A Study of the Machinability of Gray Iron Foundry, Vol. 89, 1981, pag. 78.
- [48] ERICKSON, P.S. & HARDY, J.M. - Effect of Manganese Sulfide Inclusions in Cast Iron on Tool Life. A.F.S. Trans, vol. 84, 1976.
- [49] CARDEN, R.L. & LAMBE, A.D. - The Machining of Cast Iron BCIPA Journal, november, 1965.
- [50] HEINE, H. - Machining Maleable Iron, pag. 898.
- [51] COLWELL, L.V.; HOLMES, H.J. - A comparison of parameters for the Machining of Gray Iron - Trans. ASME, Vol. 74 - Pag. 1029, August, 1952.
- [52] Morfologia da grafita em Ferro Fundido - Especificação Norma ABNT - EB-1151/80.
- [53] LORIA, E.A. - Machinability of Gray Iron By Constant Pressure Lathe Tests - Foundry, Vol. 80, March, 1952, pag. 194.

- [54] AUSTIN, W. - Improvement of Machinability in High-Phosphorus Gray Cast Iron - Part II - AFS Trans. - Vol. 59, 1951, pag. 282.
- [55] HAM, I.; HITOMI, K.; THUERING, G.L. - Machinability of Nodular Cast Irons, Part I - Tool forces and flank adhesion. Trans. ASME, May, 1961, 142.
- [56] SY, A. - Copper in Cast Iron - Modern Casting, June 1959, pag. 41.
- [57] ROUMESY, B.; BEDRIN, C. - Correlation Between Evolution of Tool piece thermoelectrical force and tool wear during machinability fast tests. Annals of the CIRP, 28/7/1979, pag. 35.
- [58] BOEHS, L. - Influência do sulfeto de manganês na usinabilidade do ferro fundido maleável preto ferrítico - Tese de mestrado - Florianópolis - SC.
- [59] A calculadora na tomada de decisões - Texas Instruments - traduzido por T. Sansen.

A P Ê N D I C E I

RESULTADOS EXPERIMENTAIS DOS ENSAIOS DE USINABILIDADE
NA OPERAÇÃO DE TORNEAMENTO CILÍNDRICO

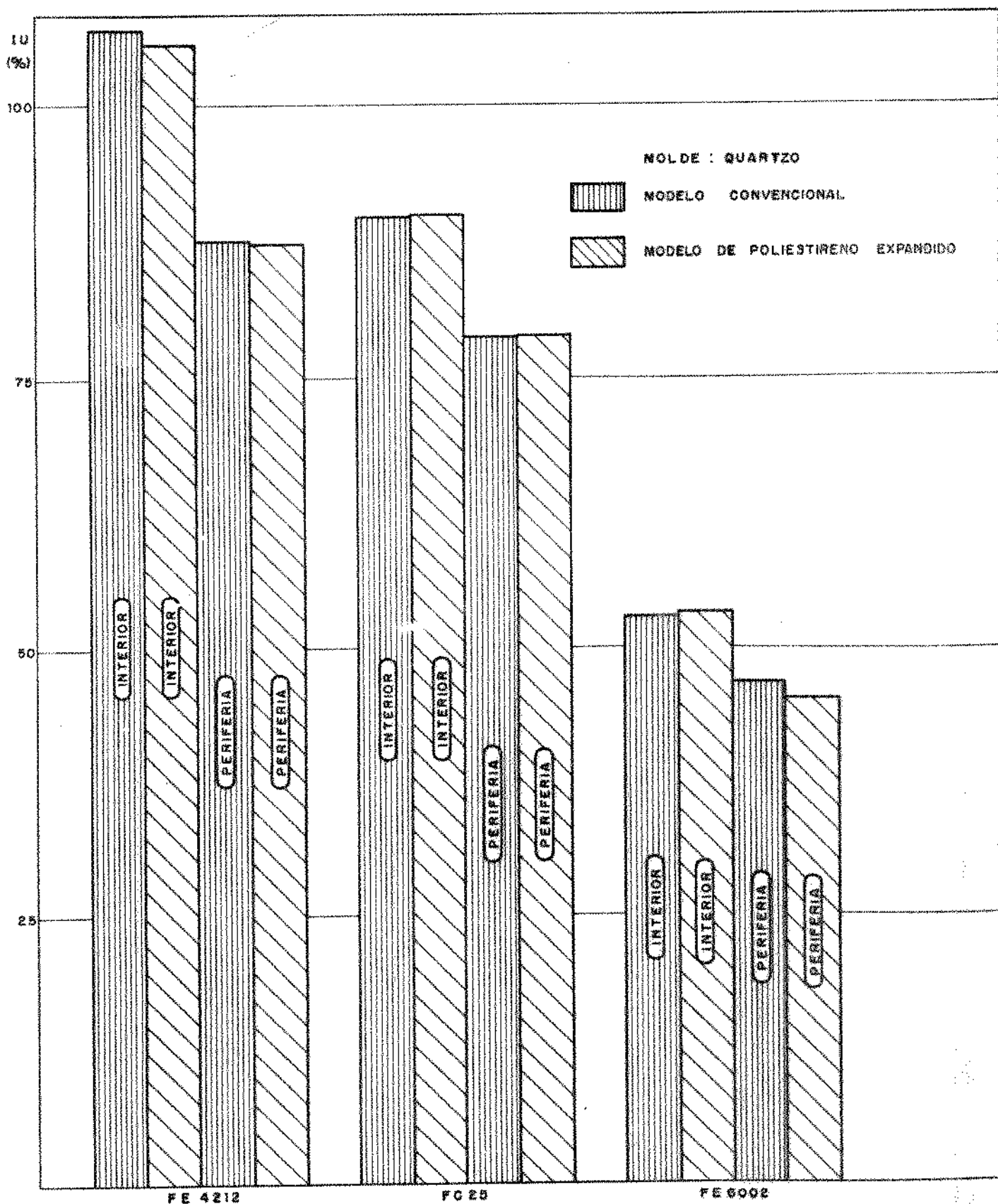


FIG. (I.1) VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE USABILIDADE DOS FERROS FE 4212, FC 25 E FE 6002
 CONDIÇÕES : FIXADO MATERIAL DO MOLDE : QUARTZO
 PARAMETRIZADO : MODELO E REGIÃO ENSAIADA

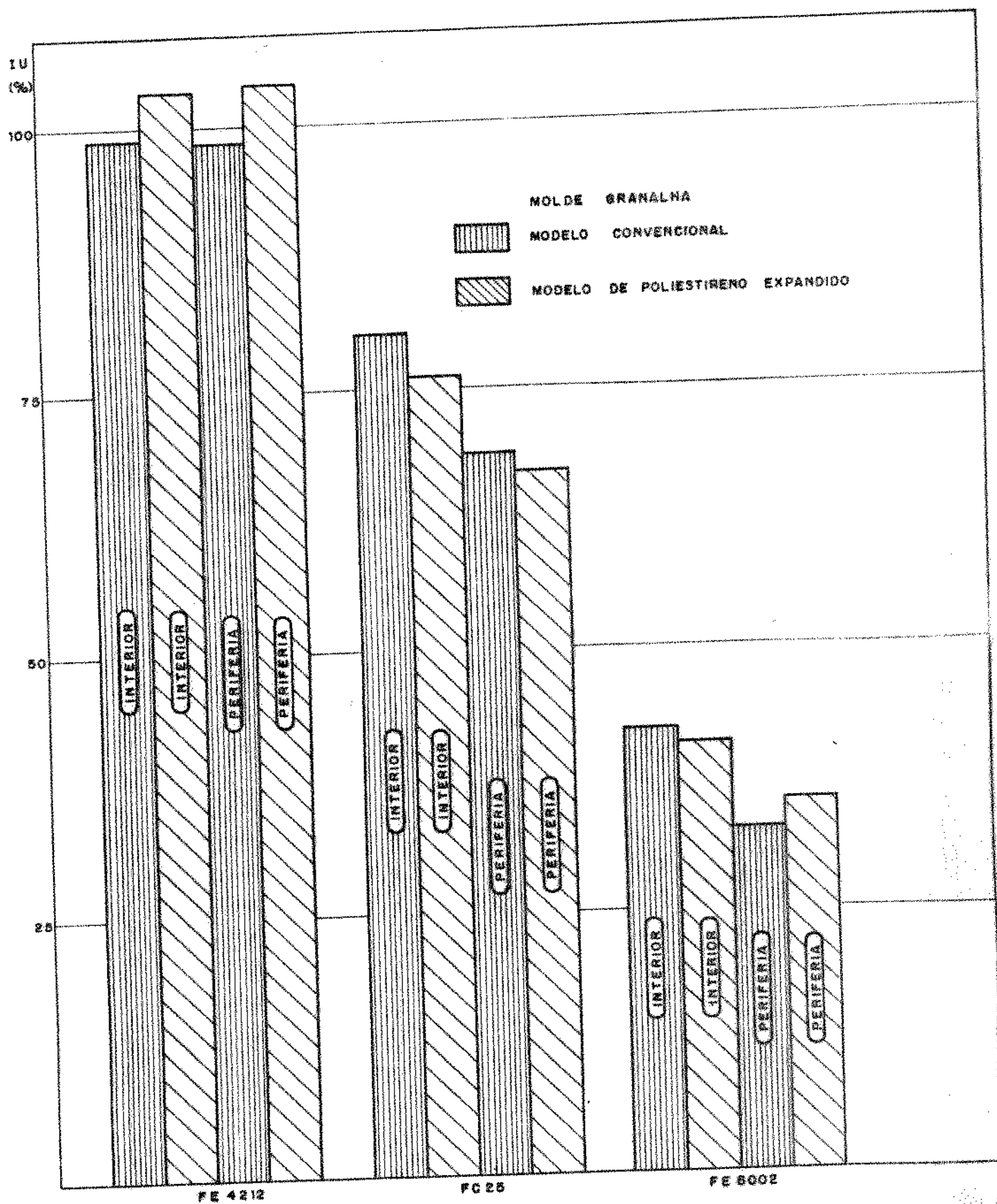


FIG. (I.2) VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE USINABILIDADE DOS FERROS FE 4212, FC 26 E FE 6002
 CONDIÇÕES : FIXADO MATERIAL DO MOLDE : GRANALHA
 PARAMETRIZADO : MODELO E REGIÃO ENSAIADA

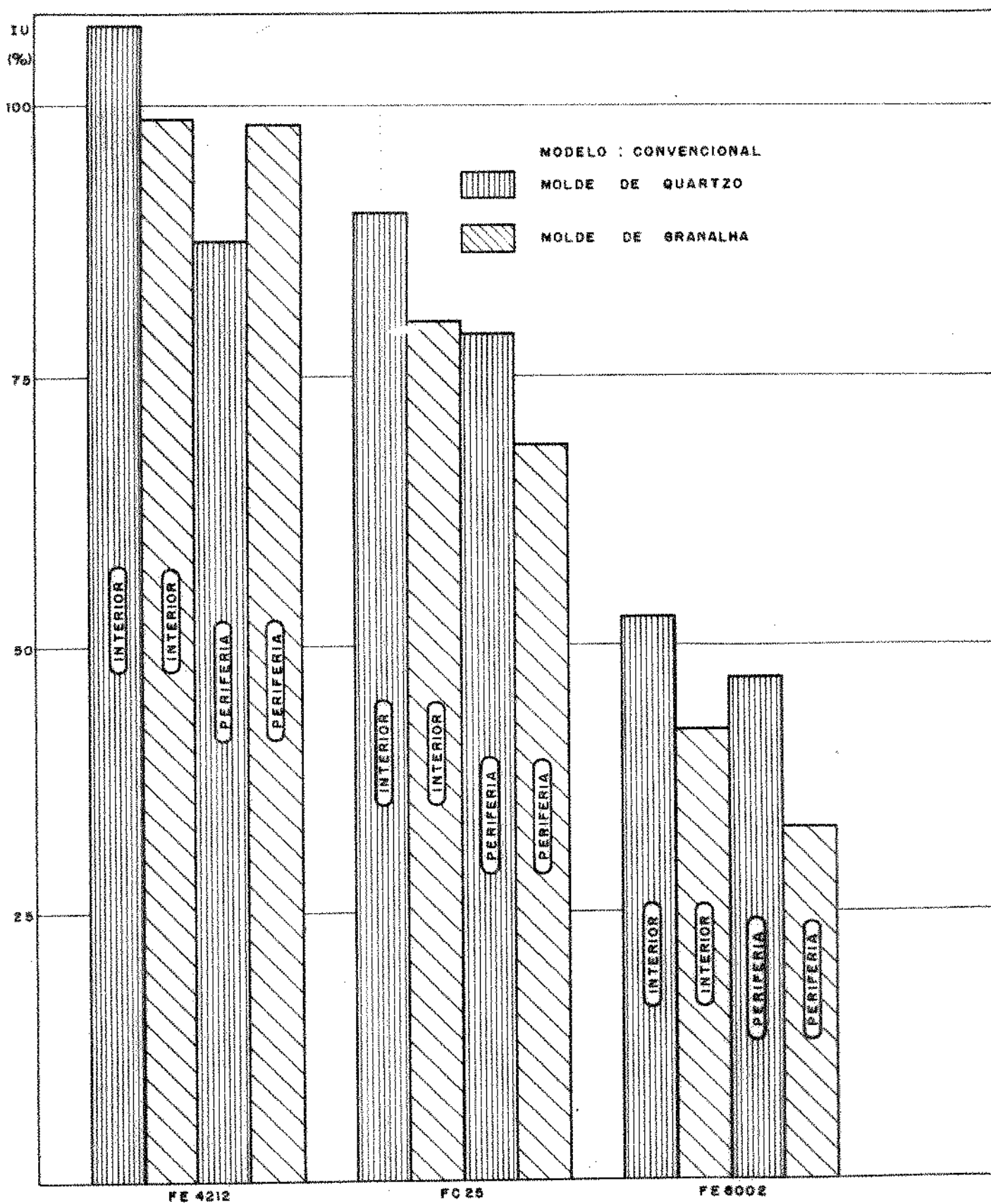


FIG. (1.3) VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE USINABILIDADE DOS FERROS FE 4212, FC 25 E FE 6002
 CONDIÇÕES : FIXADO MATERIAL DO MODELO : CONVENCIONAL
 PARAMETRIZADO : MOLDE E REGIÃO ENSAIADA

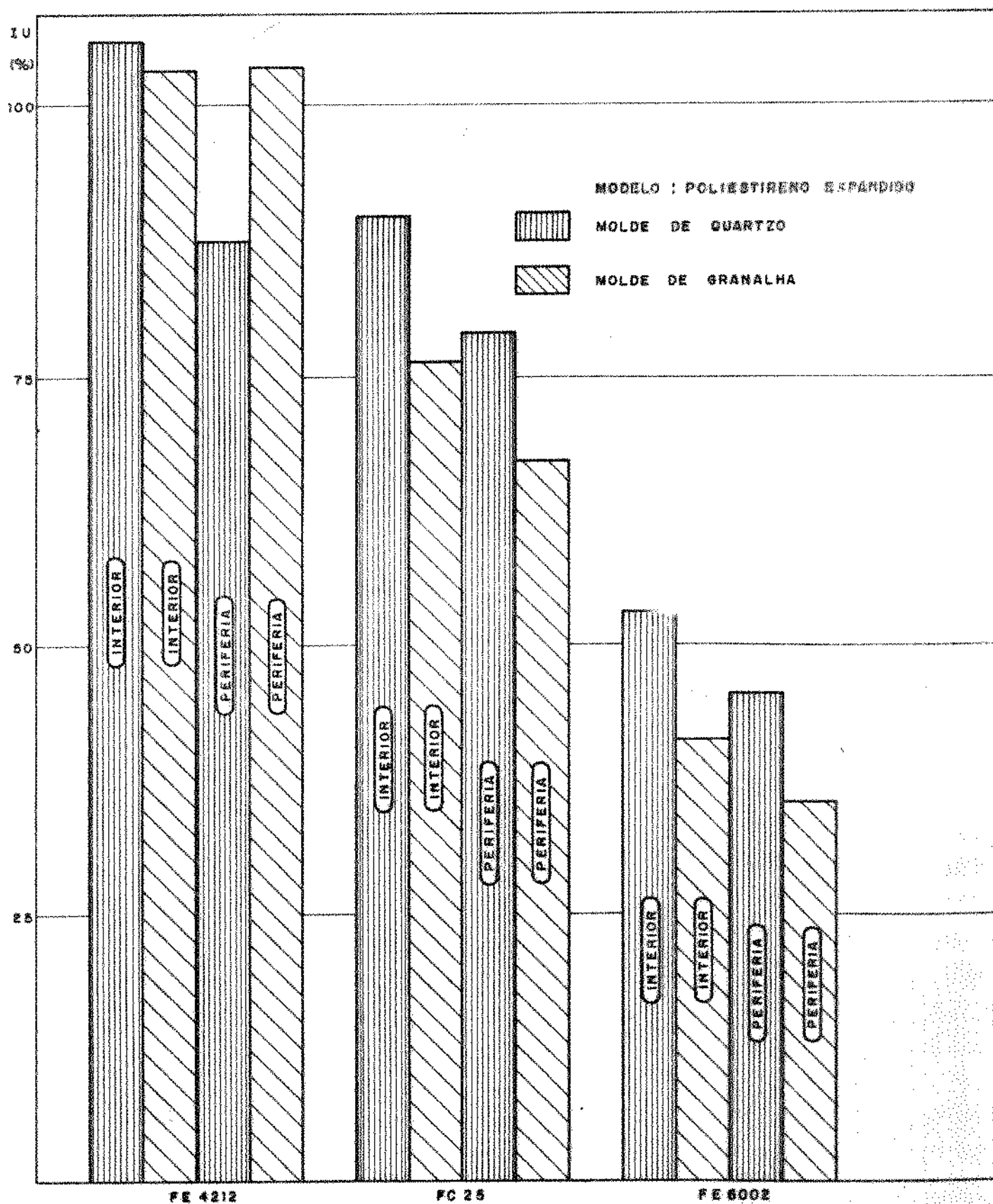


FIG. (1.4) VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE USABILIDADE DOS FERROS FE 4212, FC 25 E FE 6002
 CONDIÇÕES : FIXADO MATERIAL DO MODELO : POLIESTIRENO EXPANDIDO
 PARAMETRIZADO : MOLDE E REGIÃO ENSAIADA

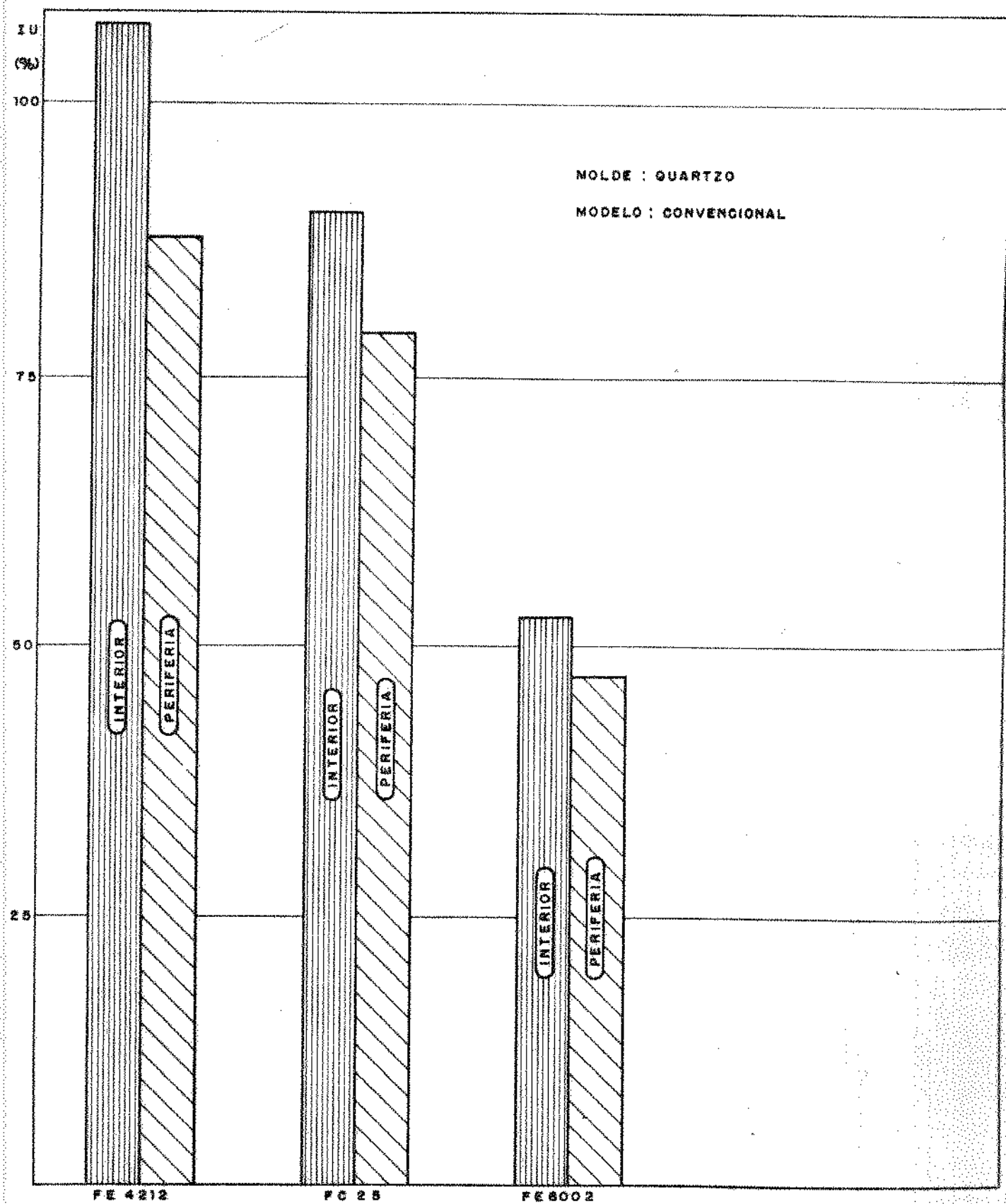


FIG. (1.5) VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE USINABILIDADE DOS FERROS FE 4212, FC 25 E FE 6002
CONDIÇÕES : FIXADO MATERIAL DO MOLDE E DO MODELO (QUARTZO E CONVENCIONAL)
PARAMETRIZADO : REGIÃO ENSAIADA

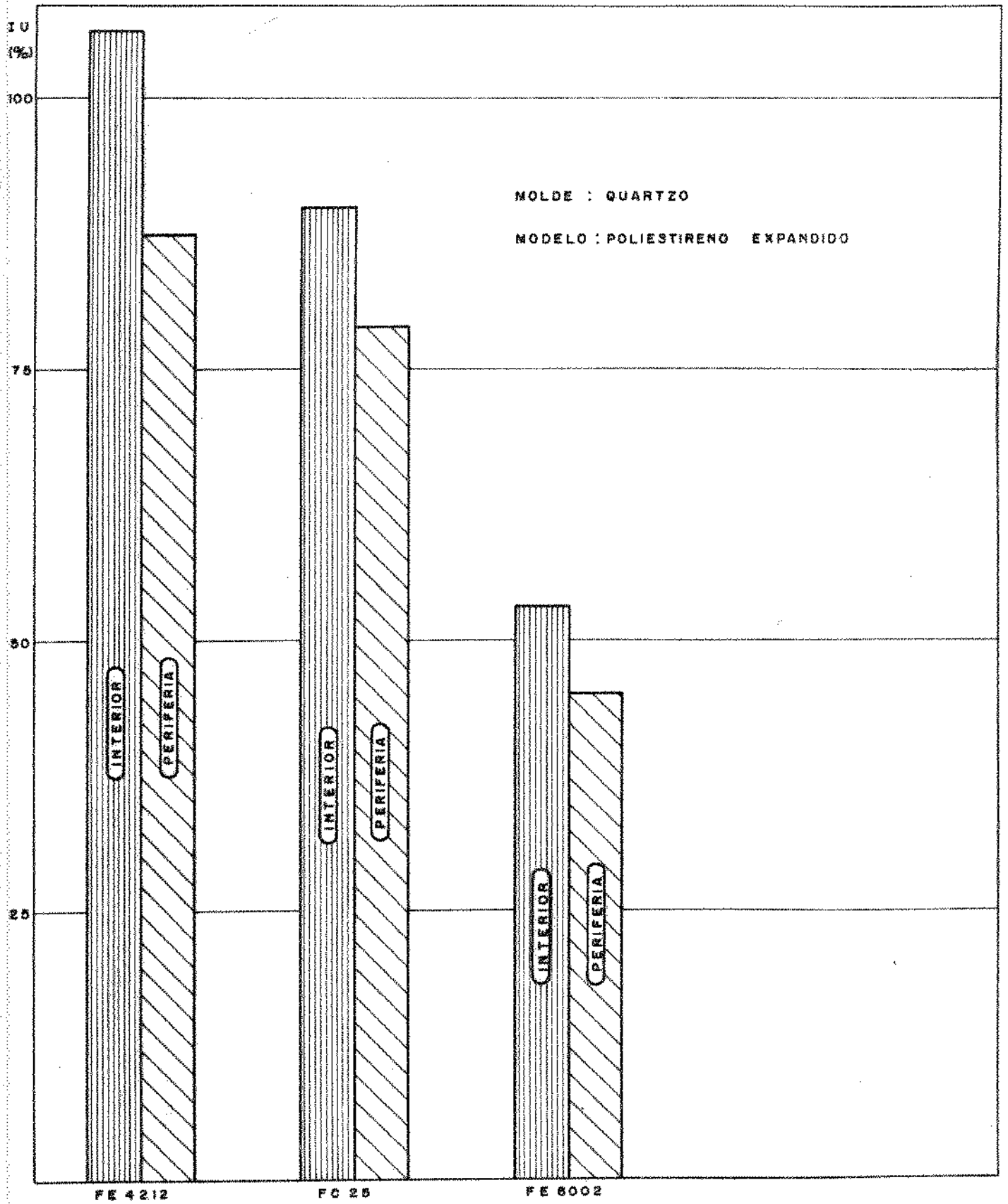


FIG. (1.6) VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE USINABILIDADE DOS FERROS FE 4212, FC 25 E FE 6002
CONDIÇÕES : FIXADO MATERIAL DO MOLDE E DO MODELO (QUARTZO E POLIESTIRENO
EXPANDIDO)
PARAMETRIZADO : REGIÃO ENSAIADA

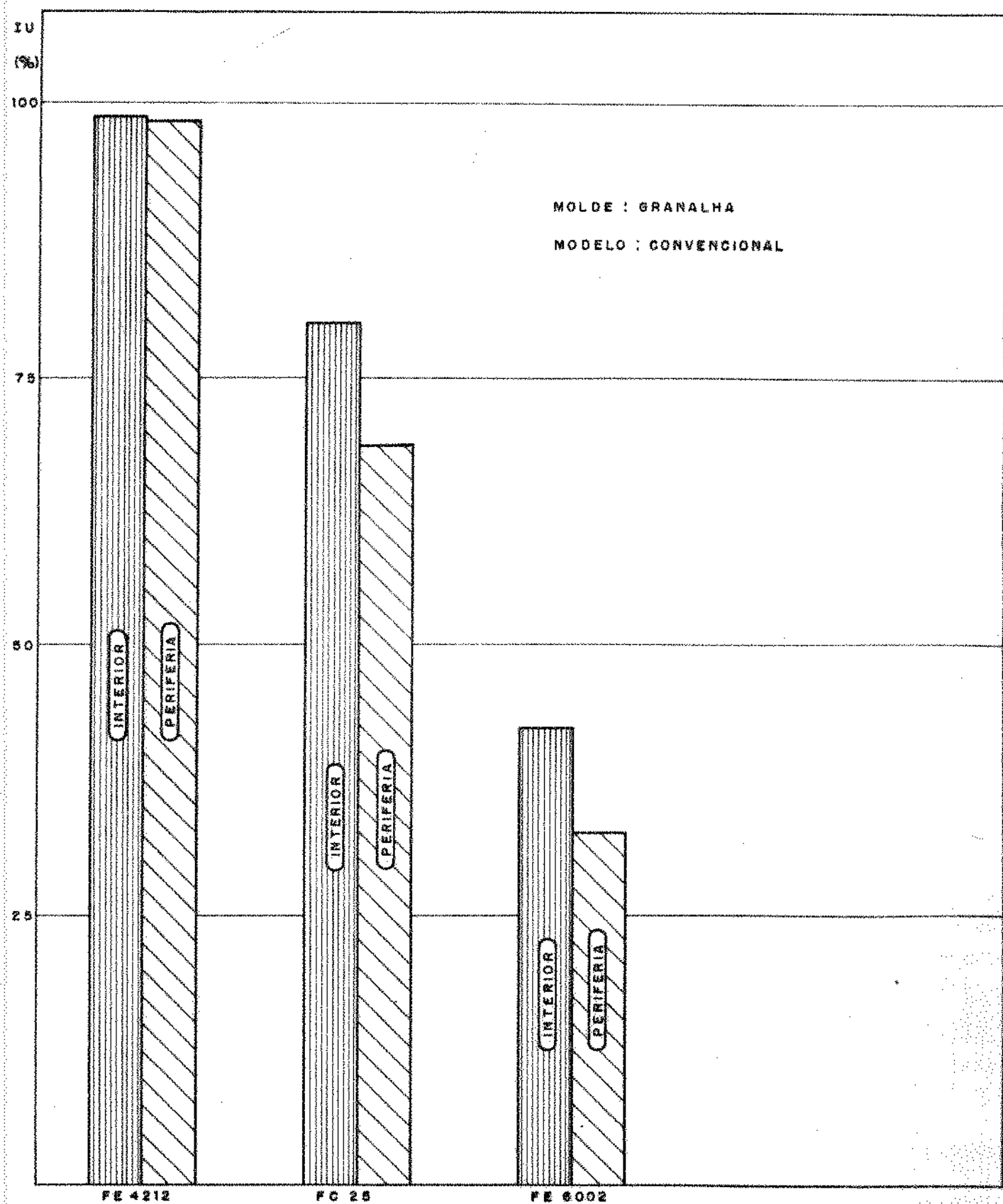


FIG. (1.7) VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE USABILIDADE DOS FERROS FE 4212, FC 25 E FE 6002
CONDIÇÕES : FIXADO MATERIAL DO MOLDE E DO MODELO (GRANALHA E CONVENCIONAL)
PARAMETRIZADO : REGIÃO ENSAIADA

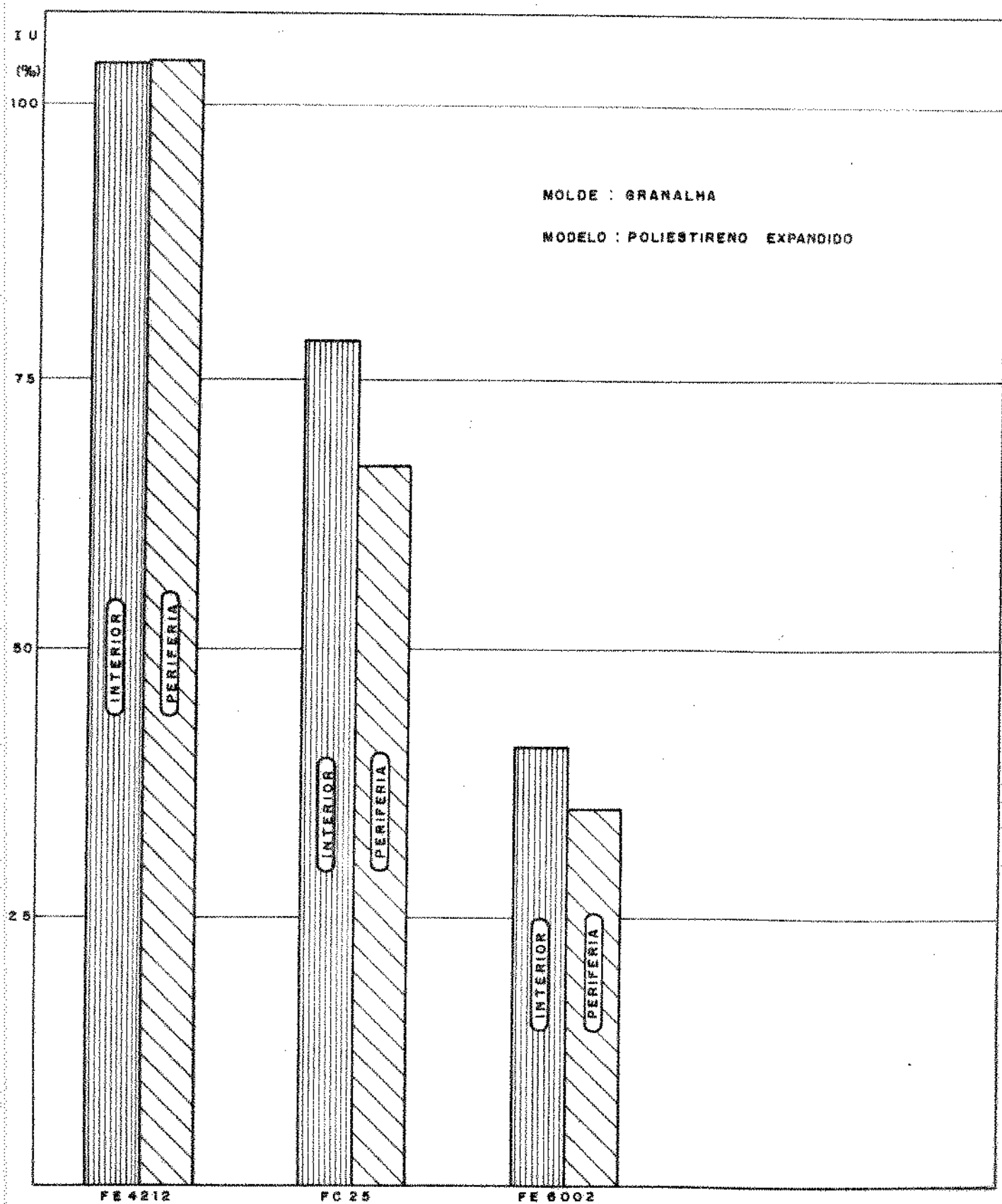


FIG. (1.8) VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE USINABILIDADE DOS FERROS FE 4212 , FC 25 E FE 6002
CONDIÇÕES : FIXADO MATERIAL DO MOLDE E DO MODELO (GRANALHA E POLIESTI-
PARAMETRIZADO : REGIÃO ENSAIADA RENO EXPANDIDO)

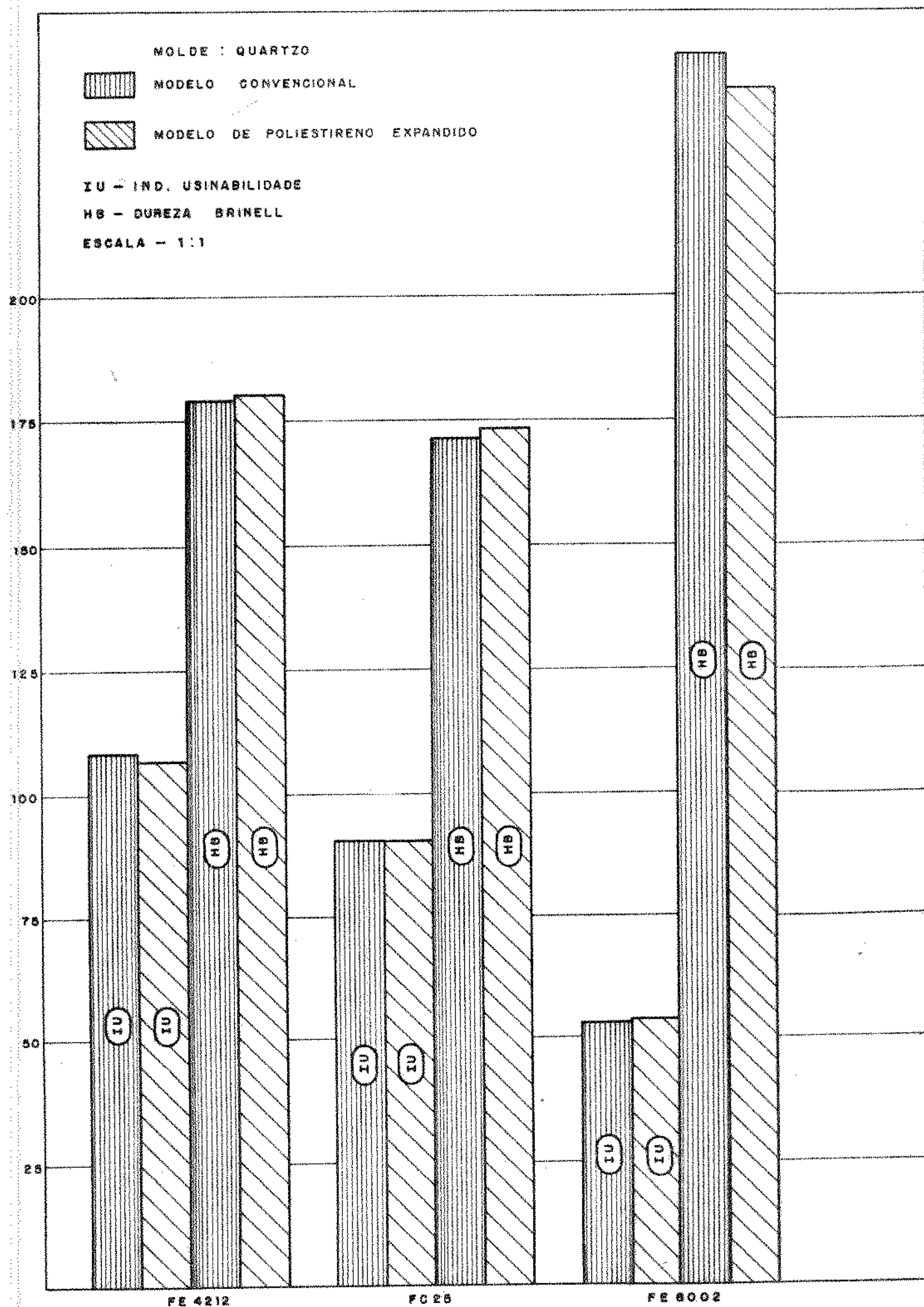


FIG. (I. 9) VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE USINABILIDADE COM DUREZA BRINELL
 CONDIÇÕES : FIXADO MATERIAL DO MOLDE : QUARTZO
 PARAMETRIZADO : MODELO

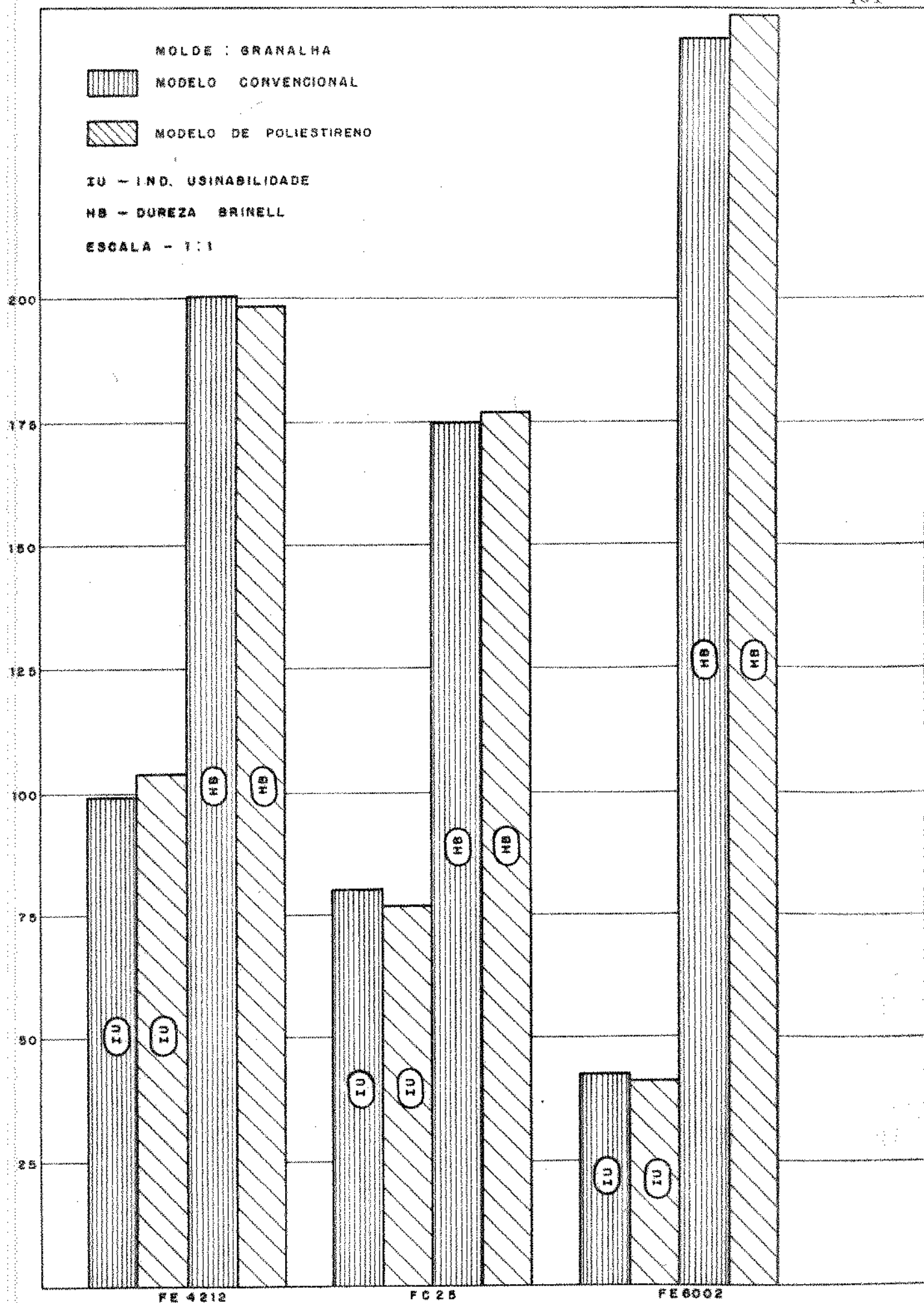


FIG. (I.10) VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE USINABILIDADE COM DUREZA BRINELL
 CONDIÇÕES : FIXADO MATERIAL DO MOLDE : GRANALHA
 PARAMETRIZADO : MODELO

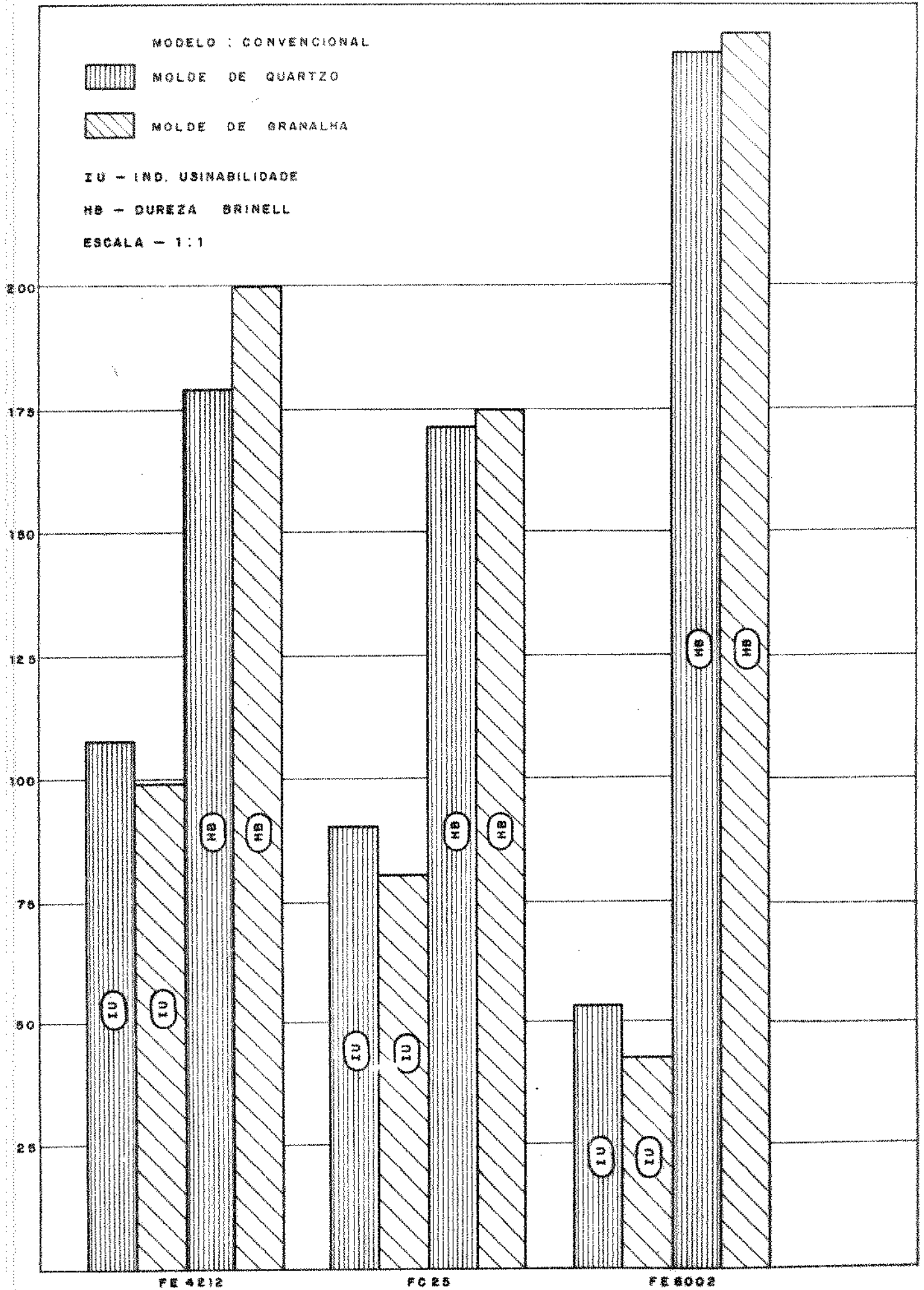


FIG. (1.11) VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE USINABILIDADE COM DUREZA BRINELL
 CONDIÇÕES : FIXADO MATERIAL DO MODELO : CONVENCIONAL
 PARAMETRIZADO : MOLDE

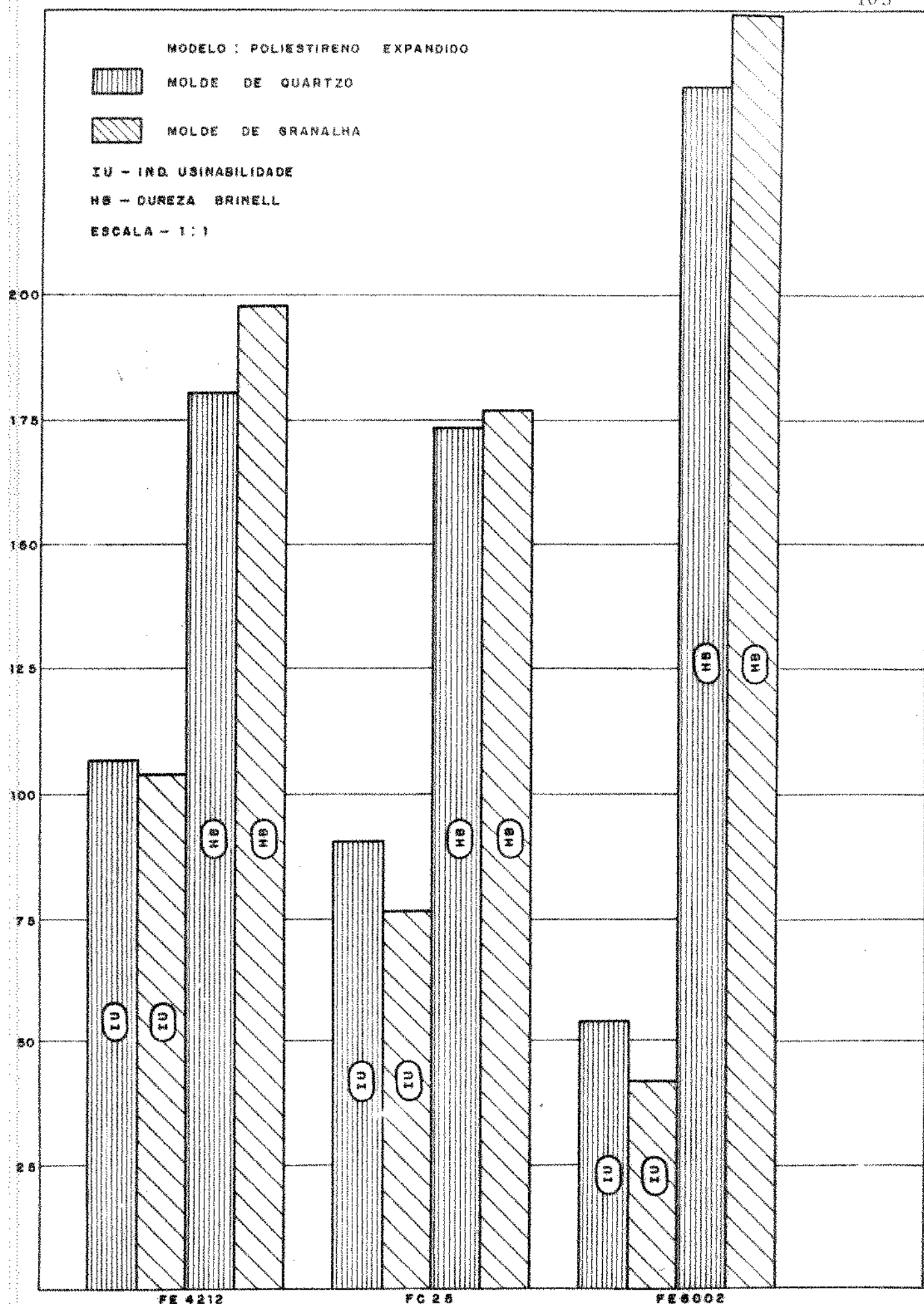


FIG. (I. 12) VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE USINABILIDADE COM A DUREZA BRINELL
 CONDIÇÕES : FIXADO MATERIAL DO MODELO : POLIESTIRENO EXPANDIDO
 PARAMETRIZADO : MOLDE

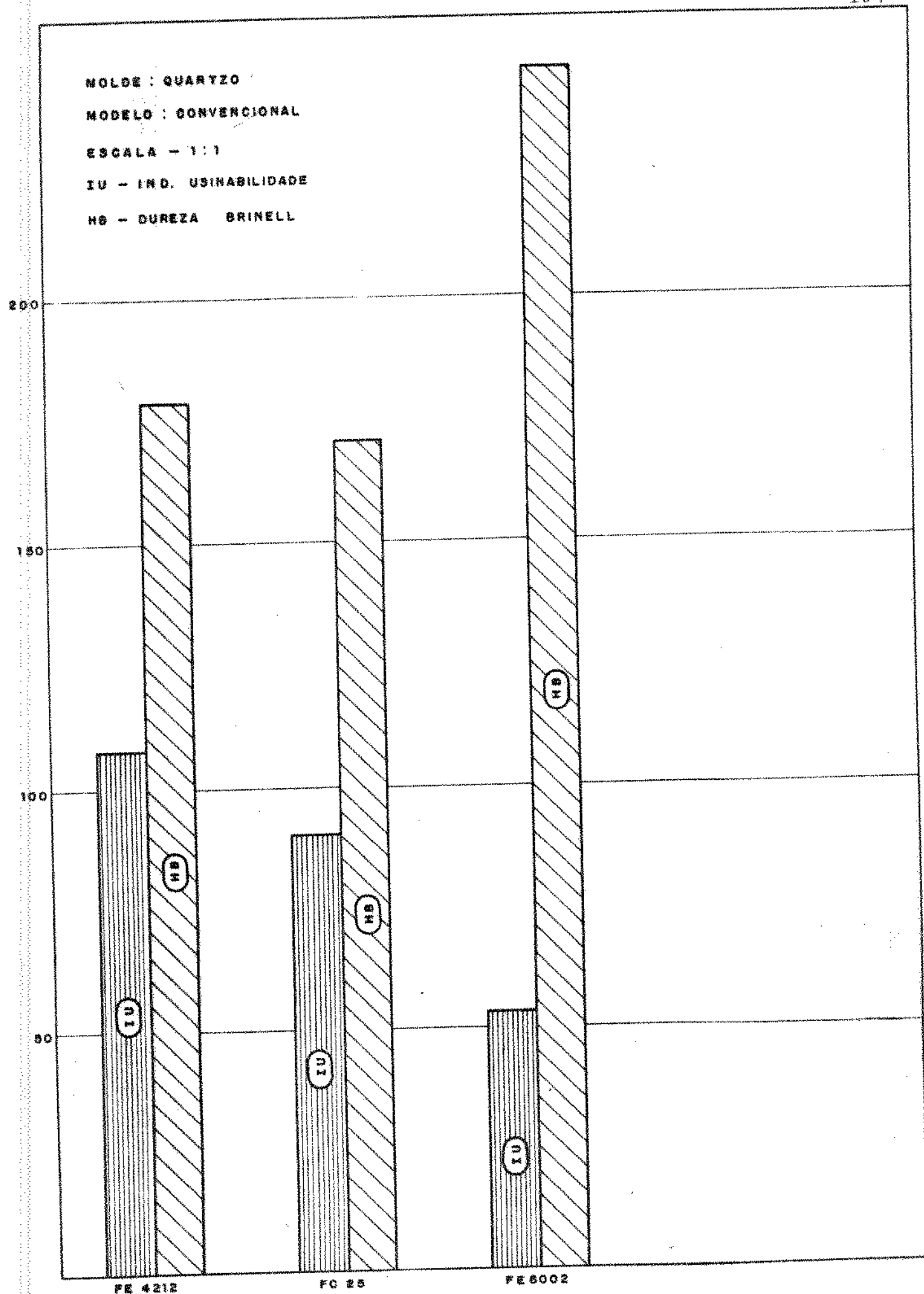


FIG. (I.13) VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE USINABILIDADE COM A DUREZA BRINELL
 CONDIÇÕES : FIXADO MATERIAL DO MOLDE : QUARTZO
 FIXADO MATERIAL DO MODELO : CONVENCIONAL

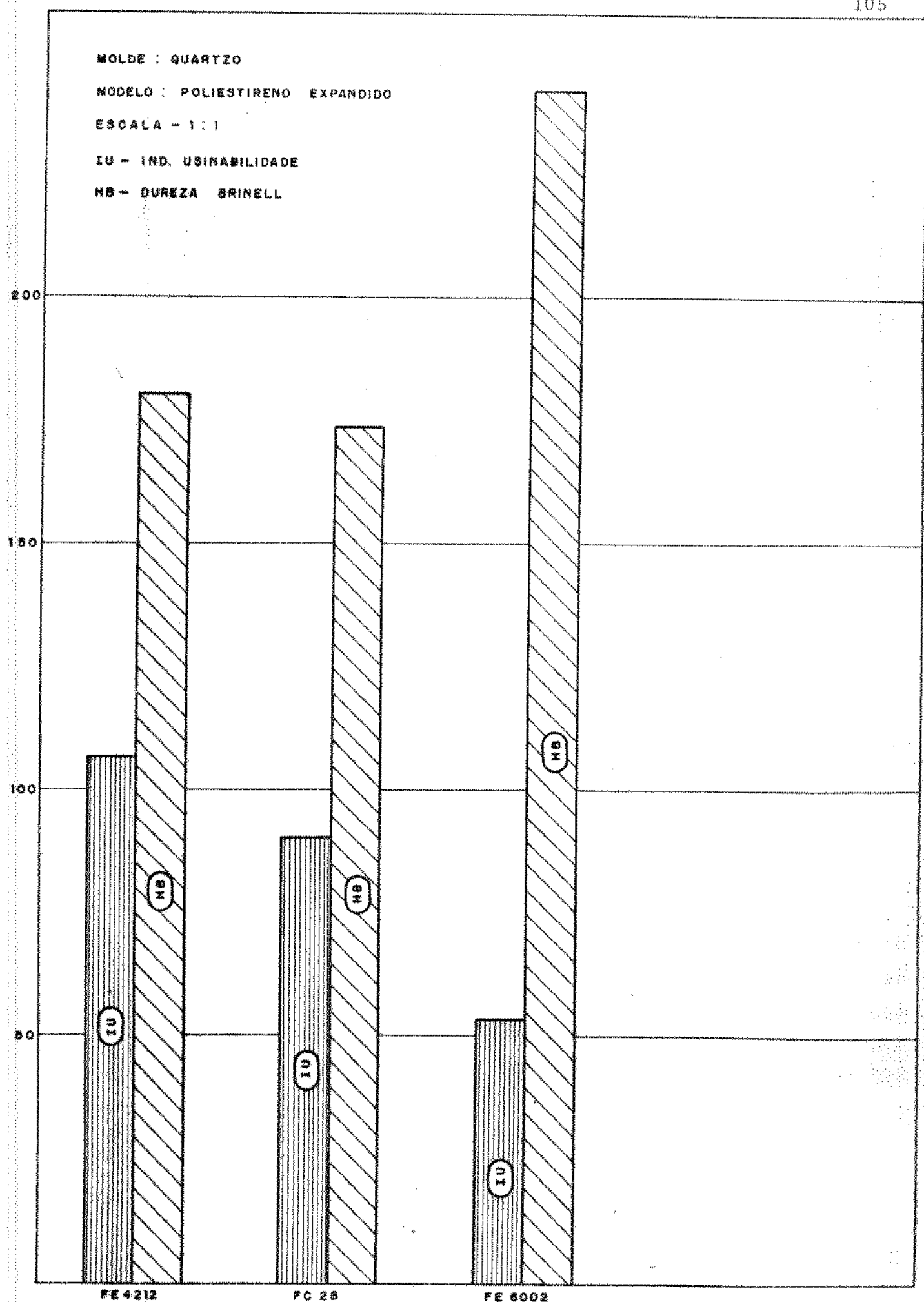


FIG. (I . 14) VARIACÃO DO ÍNDICE DE USINABILIDADE COM A DUREZA BRINELL
CONDICOES : FIXADO MATERIAL DO MOLDE : QUARTZO
FIXADO MATERIAL DO MODELO : POLIESTIRENO EXPANDIDO

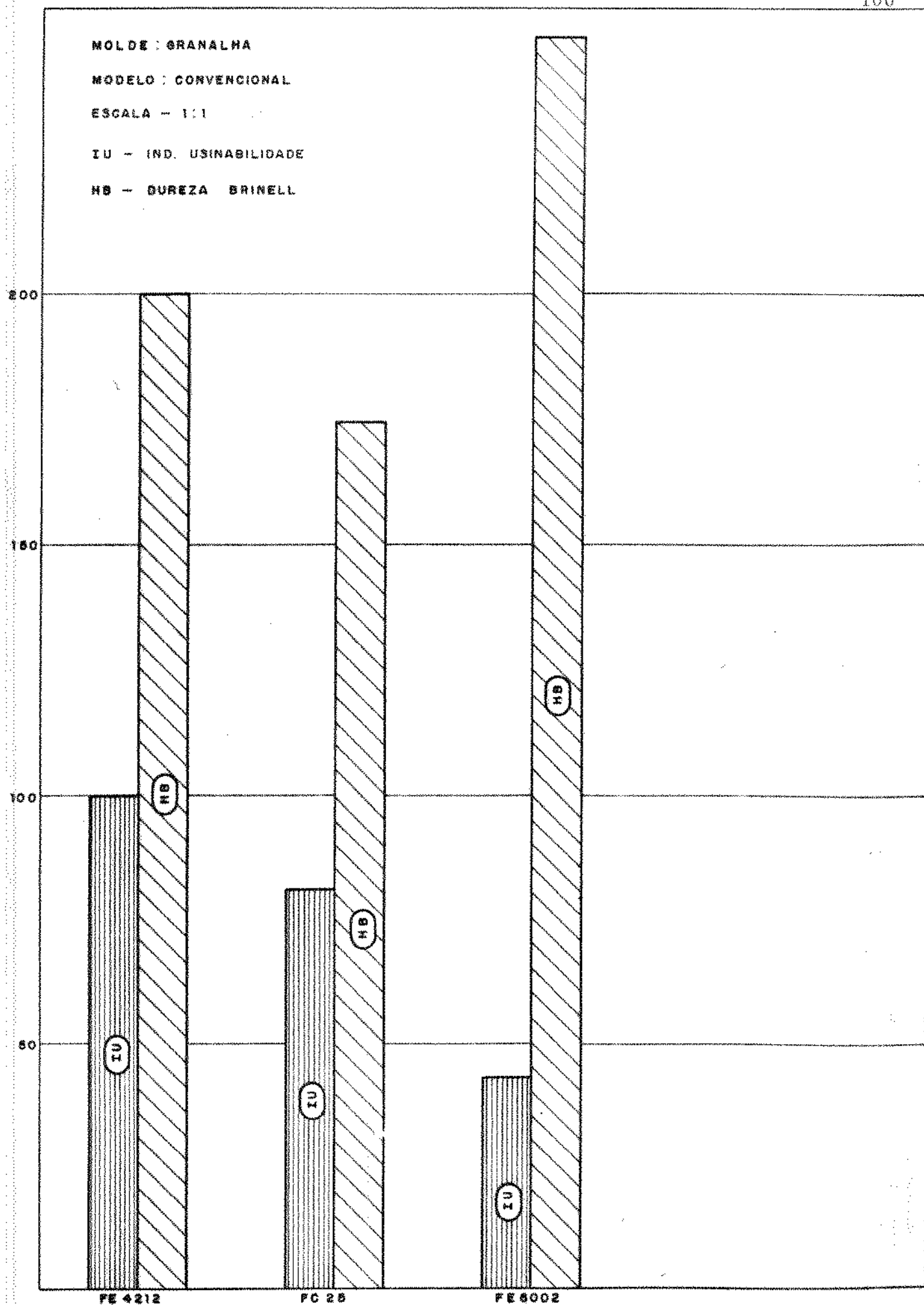


FIG. (1.15) VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE USINABILIDADE COM A DUREZA BRINELL

CONDIÇÕES : FIXADO MATERIAL DO MOLDE : GRANALHA
 FIXADO MATERIAL DO MODELO : CONVENCIONAL

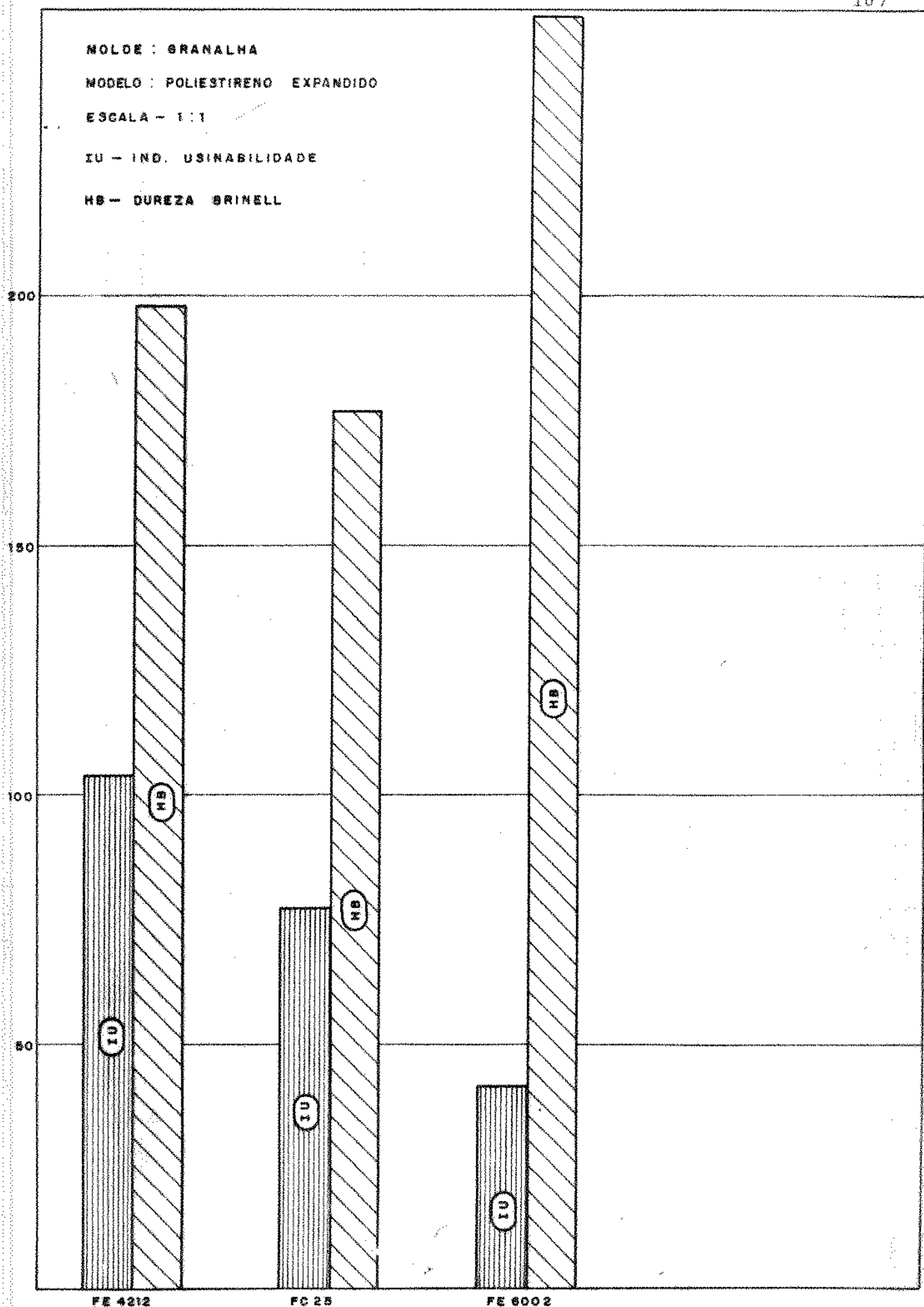


FIG. (I.16) VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE USINABILIDADE COM A DUREZA BRINELL
 CONDIÇÕES : FIXADO MATERIAL DO MOLDE : GRANALHA
 FIXADO MATERIAL DO MODELO : POLIESTIRENO EXPANDIDO

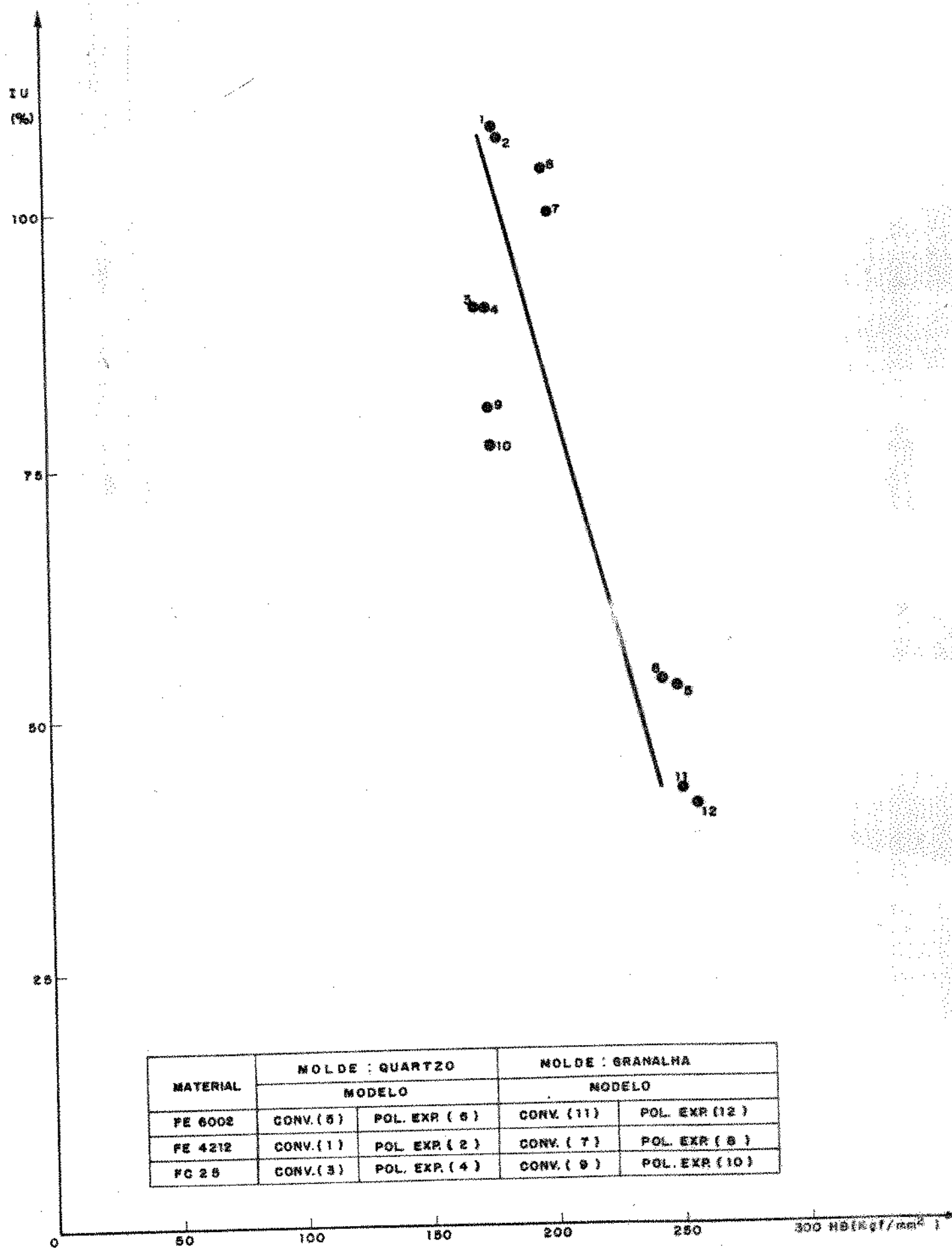


FIG. (I, 17) VARIACÃO DO ÍNDICE DE USINABILIDADE NA OPERAÇÃO DE TORNEAMENTO CILÍNDRICO COM A DUREZA BRINELL DOS FERROS FE 4212, FC 25 E FE 6002

MATERIAL		Tempo de usinagem (seg.)			Média \bar{T}	Velocidade de corte comparativa (V_c)			Média \bar{V}_c	Desvio Padrão	Índice de usina- bilidade $I.U. = V_c^E / V_c^P \cdot 100$ (%)
Nomen- clatura	Processo	1º	2º	3º		1º	2º	3º			
FE4212	quartzo conven.	135,15	146	140,6	140,7	69,47	72,0	71,3	70,9	1,30	88,12
	quartzo pol.exp.	146,2	142	132,0	140,0	74,93	68,4	69,0	70,8	3,60	88,0
	granalha conven.	144,2	143,3	136,9	141,5	80,0	80,7	79,2	79,73	0,7	99,1
	granalha pol.exp.	145,1	145,8	141,9	141,5	81,2	82,6	87,18	83,66	3,12	103,9
	quartzo conven.	134,4	131	131,7	132,4	64,2	63,80	63,015	63,65	0,6	79,10
FC25	quartzo pol.exp.	136,4	132,3	132,0	133,5	66,97	63,0	61,25	63,70	2,9	79,20
	granalha conven.	123,4	123,8	109,2	119,0	55,9	56,6	54,3	55,6	1,1	69,1
	granalha pol.exp.	118,5	116,0	121,3	118,6	54,1	54,5	54,0	54,2	0,26	67,4
	quartzo conven.	89,4	45,0	87,1	90,5	37,0	39,1	37,9	38,0	1,0	47,22
FE6002	quartzo pol.exp.	83,8	91,0	78,3	84,4	35,3	38,0	35,7	36,5	1,4	45,33
	granalha conven.	54	53	58,0	55	26,06	25,4	27,5	26,33	1,07	32,73
	granalha pol.exp.	53,7	61	59,8	58,17	27,25	29,0	29,0	28,61	1,0	35,56
	padrão	130,0	132,1	136,0	132,8	80,5	85,0	86,85	80,45	3,4	100,0

TABELA I.1 - Dados experimentais dos ensaios de usinagem na operação de torneamento cilíndrico.
Região: periferia do corpo de prova.

MATERIAL		Tempo de usinagem (seg.)			Média \overline{T}	Velocidade de corte comparativa (V_C)			Média $\overline{V_C}$	Desvio padrão	Índice de usabilidade de $I.U. = V_C^E / V_C^P \cdot 100$ (%)
Nomenclatura	Processo	1º	2º	3º		1º	2º	3º			
FE4212	quartzo conven.	150,7	143	140,7		77,57	75,68	74,4	75,87	1,5	107,75
	quartzo pol.exp.	143	142	138		77,95	75,75	71,7	75,13	3,1	106,70
	granalha conven.	138,1	145,0	140,4		66,9	70,4	72,5	69,9	2,8	99,31
	granalha pol.exp.	141,7	142,8	143,3		73,4	73,0	72,8	73,05	0,3	103,74
	quartzo conven.	141,9	131	135		63,4	63,1	63,7	63,4	0,3	90,04
FC25	quartzo pol.exp.	134,5	135,2	131,5		64,35	64,92	61,3	63,4	1,9	90,1
	granalha conven.	130,6	133,1	121		58,26	58,35	52,67	56,43	3,2	80,14
	granalha pol.exp.	125,2	119,2	126		56,3	52,2	52,82	53,8	2,2	76,40
	quartzo conven.	93	91,2	95,6		37,36	37,1	36,84	37,1	0,26	52,69
FE6002	quartzo pol.exp.	94,5	98	93,3		37,2	38,3	36,5	37,36	0,60	53,07
	granalha conven.	78,5	78,8	75,0		29,2	30,7	29,1	29,8	0,89	42,30
	granalha pol.exp.	69	74,5	73,0		28,3	29,12	29,4	28,95	0,57	41,1
	padrão	114,7	150,5	90,98		68,7	69,90	72,5	70,4	1,60	100,0

TABELA I.2 - Dados experimentais dos ensaios da usinabilidade na operação de torneamento cilíndrico.
Região ensaiada - interior do corpo de prova.

MATERIAL		Índ. Usinabilidade e percentuais comparativos		Dureza Brinell e percentuais comparativos	
Nomenclatura	Modelo	U.I.	%	HB	%
FE6002	Conve.	52,7	0,7 ↓	247	2 ↑
	pol.exp.	53,1		242	
FE4212	conven.	107,7	0,9 ↑	179	2 ↓
	pol.exp.	106,7		180	
FC25	conven.	90,0	0,0 —	171	1 ↓
	pol.exp.	90,0		173	

TABELA I.3 - Correspondência entre usinabilidade e dureza dos ferros fundidos processados em molde de quartzo.

MATERIAL		Índ. Usinabilidade e percentuais comparativos		Dureza Brinell e percentuais comparativos	
Nomenclatura	Modelo	I.U.	%	HB	%
FE6002	Conven.	42,3	2,8 ↑	251	2 ↓
	pol.exp.	41,1		256	
FE4212	conven.	99,3	4,0 ↓	200	1 ↑
	pol. exp.	103,7		198	
FC25	conven.	80,14	4,5 ↑	175	0,6 ↑
	pol. exp.	76,4		176	

TABELA I.4 - Correspondência entre usinabilidade e dureza dos ferros fundidos processados em molde de granalha.

MATERIAL		Índ. Usinabilidade e percentuais comparativos		Dureza Brinell e percentuais comparativos	
Nomenclatura	Molde	I.U.	%	HB	%
FE6002	quart.	52,7	20 ↑	274	2 ↓
	gran.	42,3		251	
FE4212	quart.	107,7	8 ↑	179	10 ↓
	gran.	99,3		200	
FC25	quart.	90,0	11 ↑	171	3 ↓
	gran.	80,14		175	

TABELA I.5 - Correspondência entre usinabilidade e dureza dos ferros fundidos para modelo convencional.

MATERIAL		Índ. Usinabilidade e percentuais comparativos		Dureza Brinell e percentuais comparativos	
Nomenclatura	Molde	I.U.	%	HB	%
FE6002	quart.	53,1	23 ↑	242	6 ↓
	gran.	41,1		256	
FE4212	quart.	106,7	3 ↑	180	7 ↓
	gran.	103,7		198	
FC25	quart.	90,0	15 ↑	173	2 ↓
	gran.	76,4		176	

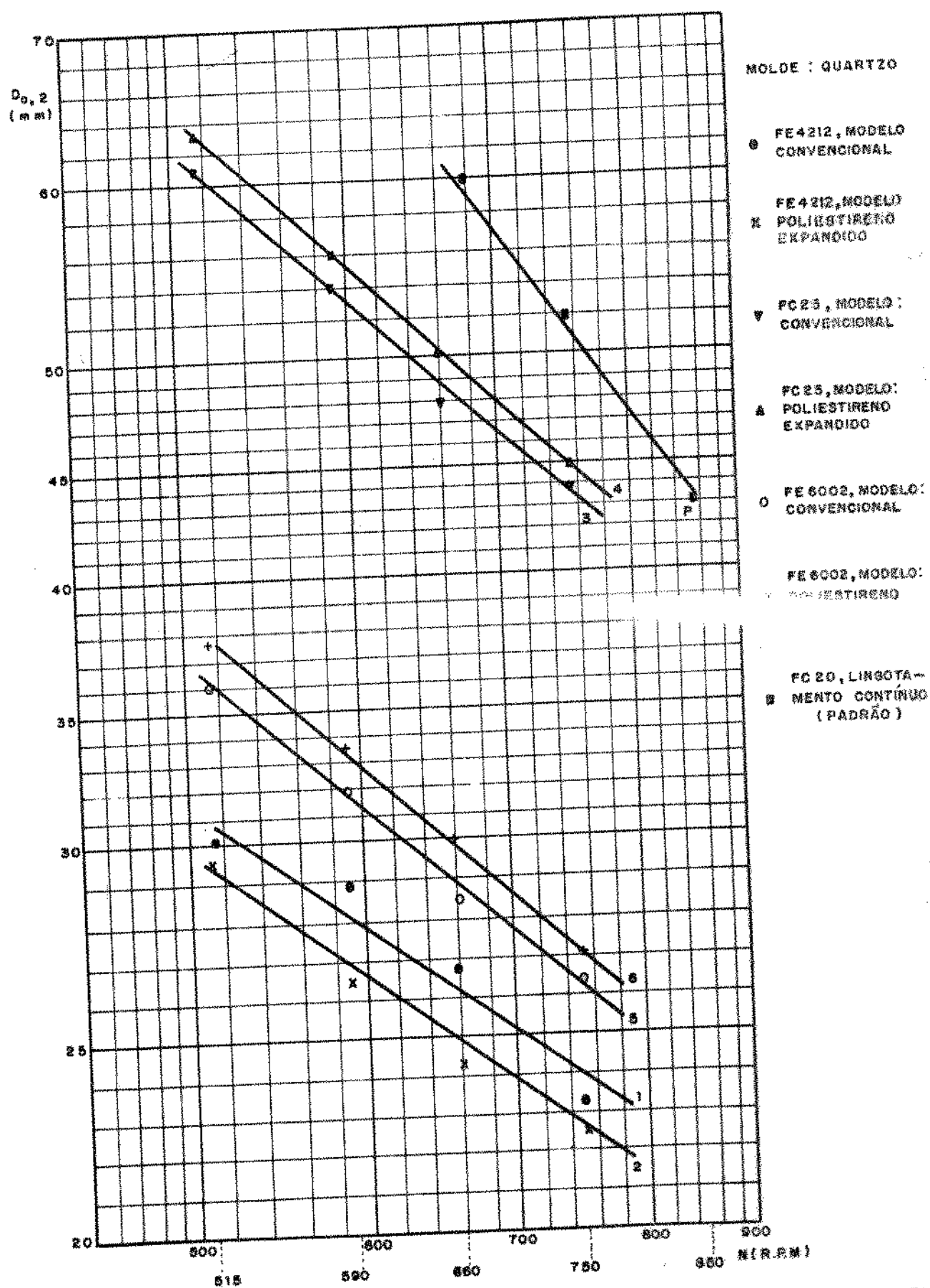
TABELA I.6 - Correspondência entre usinabilidade e dureza dos ferros fundidos para modelos e poliestireno expandido.

Processo de Fun- dição (molde e modelo)	MATERIAL	Índice de usinabilidade e per- centuais comparativos		Dureza Brinell e percentuais comparativos	
		I.U.	%	HB	%
quartzo conven.	FE4212	107,75	16	179	5
	FC25	90,00	51	171	31
	FE6002	52,70	41	247	27
quartzo poliest. expandido	FE4212	106,70	16	180	6
	FC25	90,00	50	173	24
	FE6002	53,00	41	242	28
granalha conven.	FE4212	99,30	19	200	12
	FC25	80,14	57	175	30
	FE6002	42,30	47	251	20
granalha poliest. expandido	FE4212	103,70	26	198	11
	FC25	76,40	60	176	31
	FE6002	41,10	46	256	22

TABELA I.7 - Correspondência entre usinabilidade e dureza dos ferros fundidos. Fixado material do molde e modelo, parametrizado o material ensaiado.

A P E N D I C E I I

RESULTADOS EXPERIMENTAIS DOS ENSAIOS DE USINABILIDADE
NA OPERAÇÃO DE TORNEAMENTO DE FACEAMENTO.



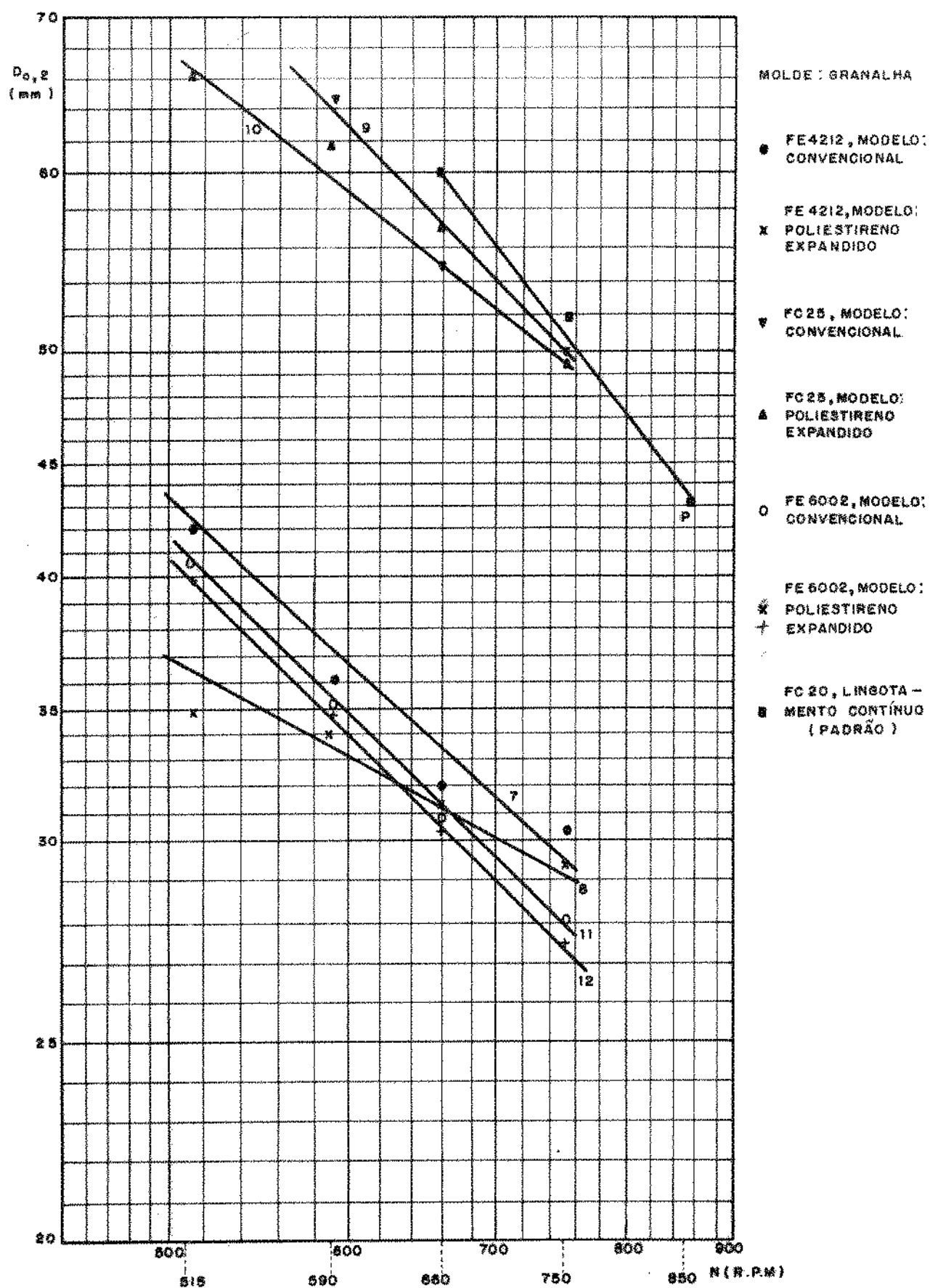


FIG. (II . 2) VARIAÇÃO DO DIÂMETRO USINADO $D_{0,2}$ EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO N
 DOS FE 4212, FE 6002 E FC 25
 CONDIÇÕES: FIXADO: MOLDE DE GRANALHA
 PARAMETRIZADO : MODELO

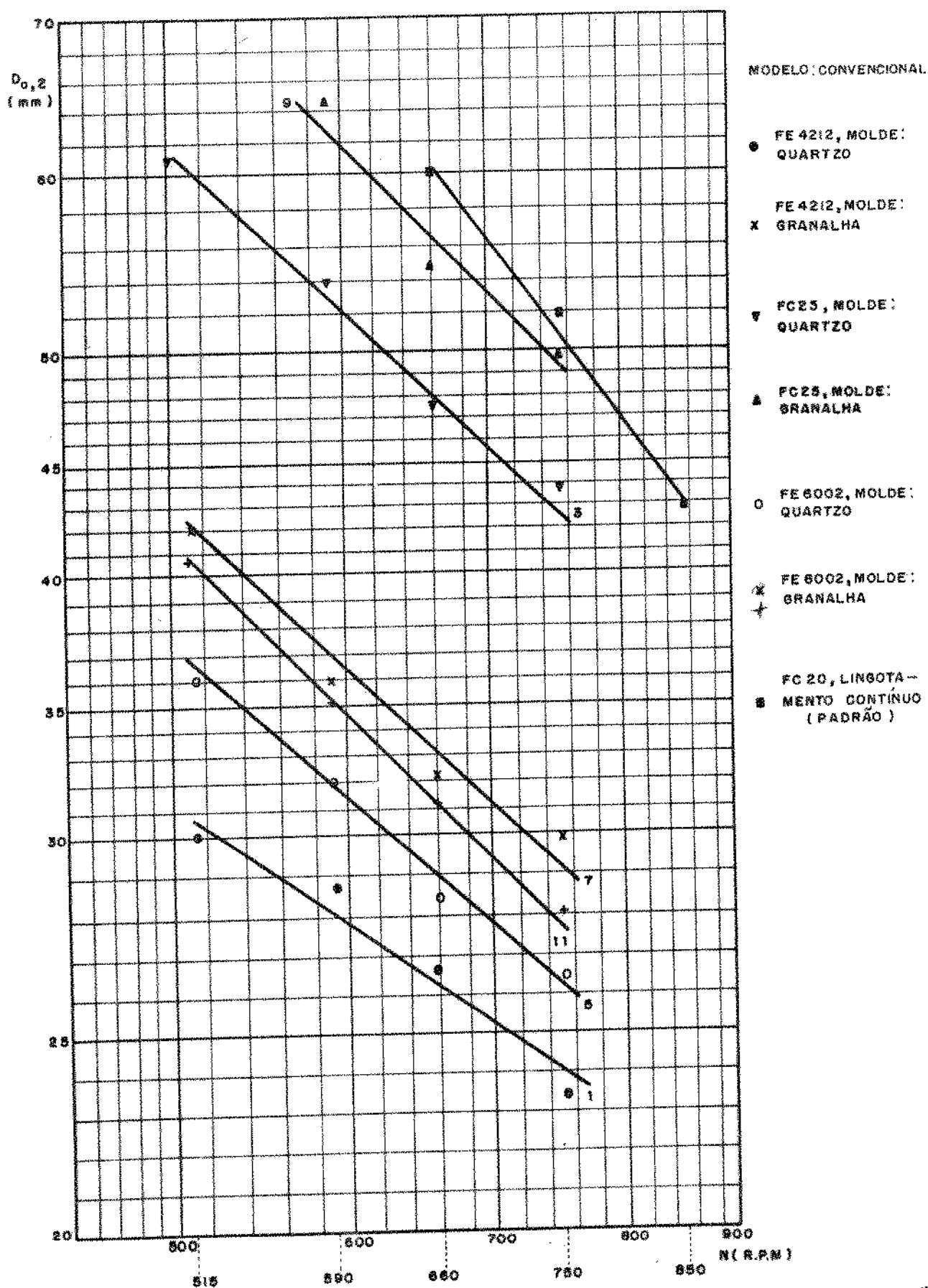


FIG. (II.3) VARIAÇÃO DO DIÂMETRO USINADO $D_{0,2}$ EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO N
 DOS FE 4212, FE 6002 E FC 25
 CONDIÇÕES: FIXADO: MODELO CONVENCIONAL
 PARAMETRIZADO: MATERIAL DO MOLDE

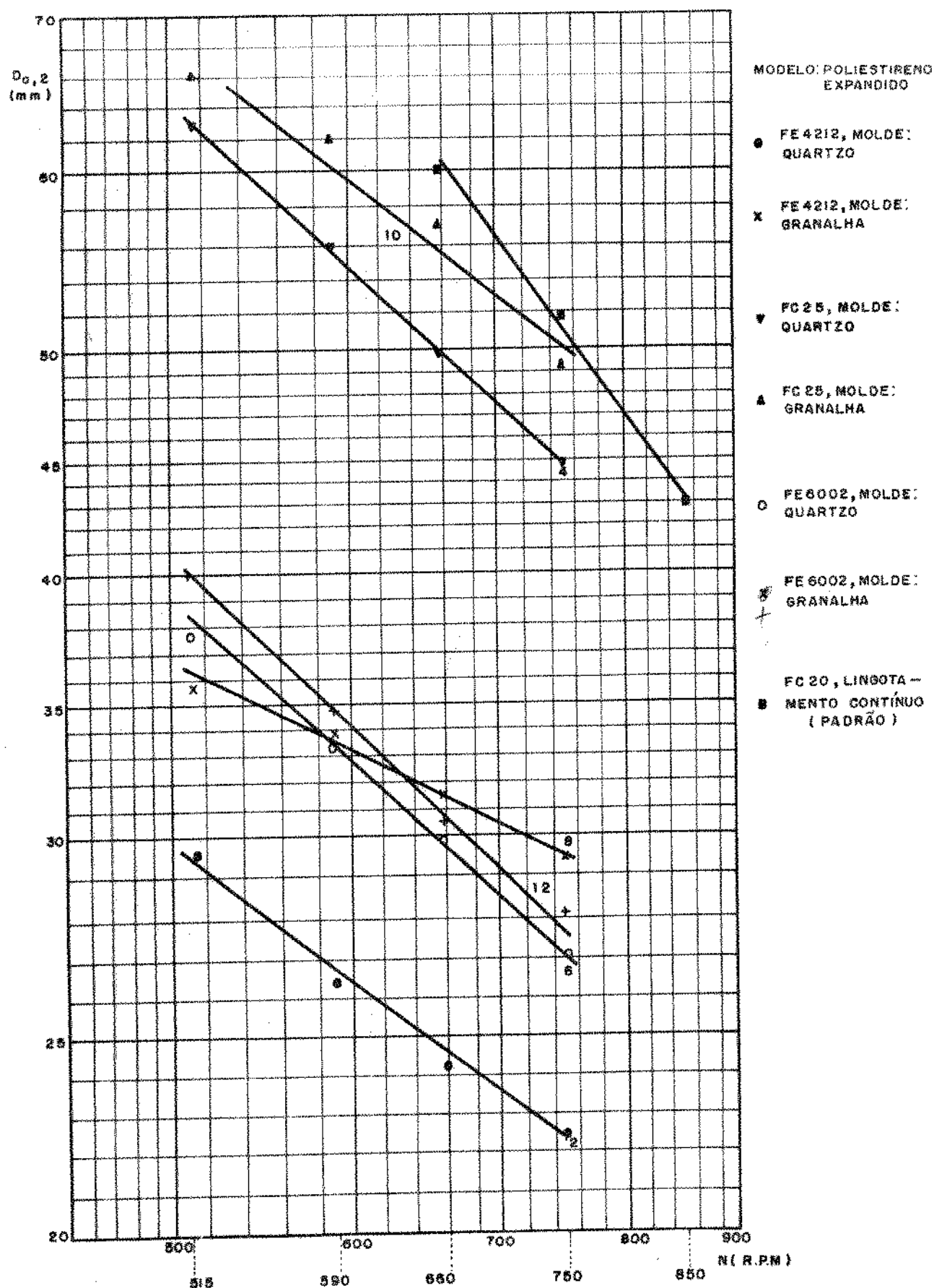


FIG. (II. 4) VARIACÃO DO DIÂMETRO USINADO $D_{0,2}$ EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO N DOS FE 4212, FE 6002 E FC 25
 CONDIÇÕES: FIXADO: MODELO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO
 PARAMETRIZADO: MATERIAL DO MOLDE

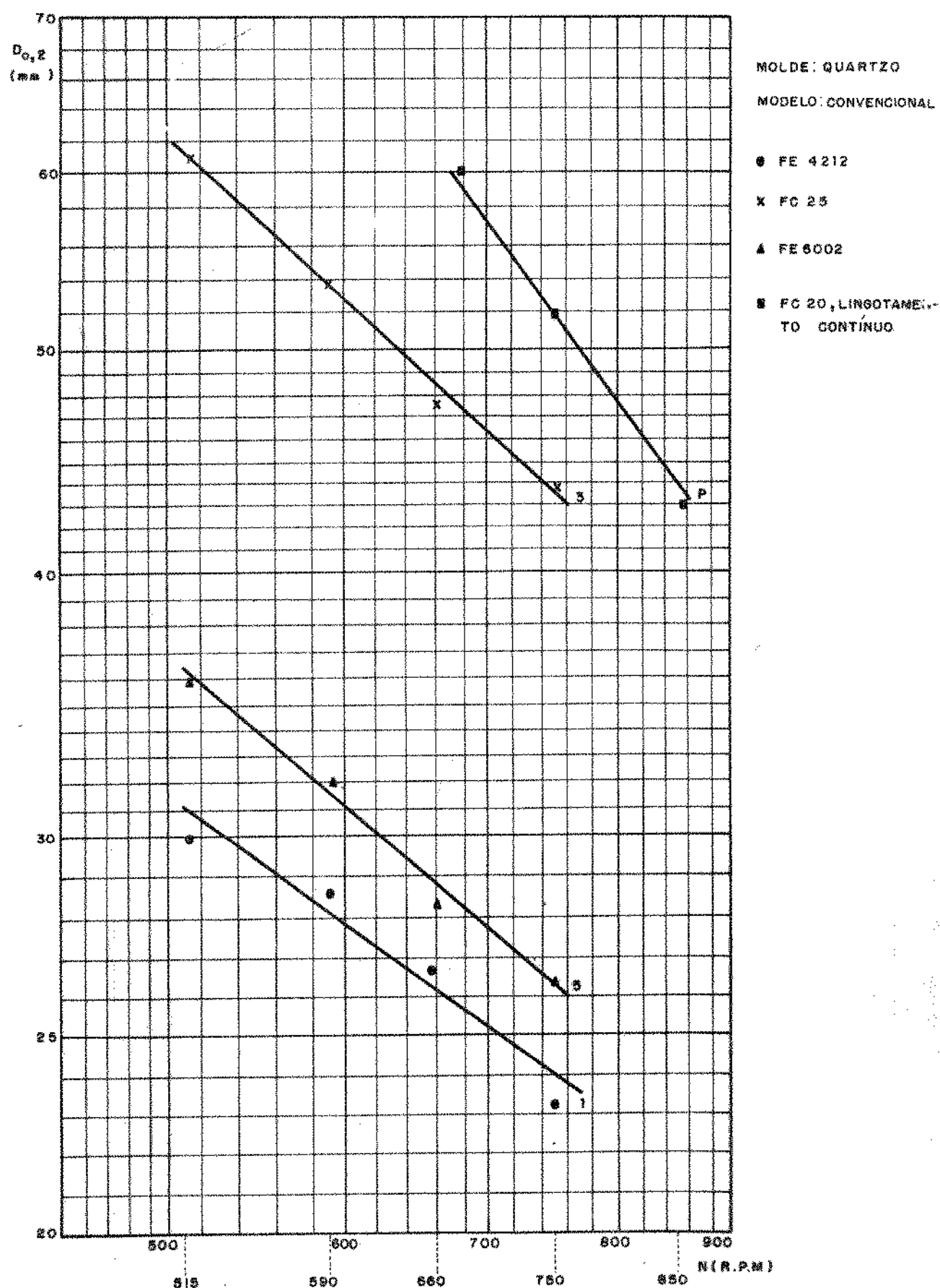


FIG. (II. 5) VARIAÇÃO DO DIÂMETRO USINADO $D_{0,2}$ EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO N DOS FE 4212, FE 6002 E FC 25
CONDIÇÕES: FIXADO: MOLDE DE QUARTZO E MODELO CONVENCIONAL
PARAMETRIZADO: MATERIAL USINADO

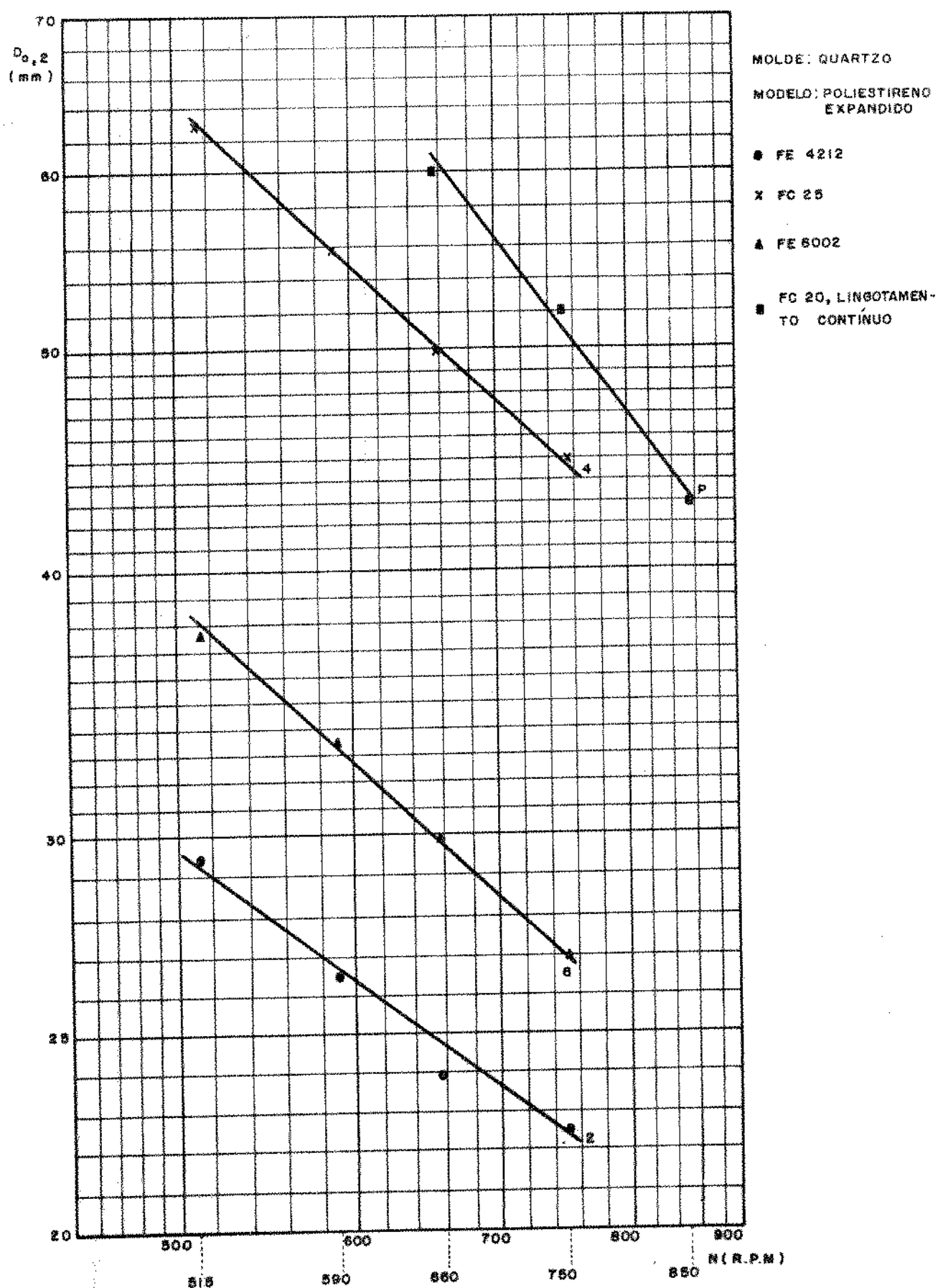


FIG. (II.6) VARIAÇÃO DO DIÂMETRO USINADO $D_{0,2}$ EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO N DOS FE 4212, FE 6002 E FC 25
 CONDIÇÕES: FIXADO: MOLDE DE QUARTZO E MODELO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO
 PARAMETRIZADO: MATERIAL USINADO

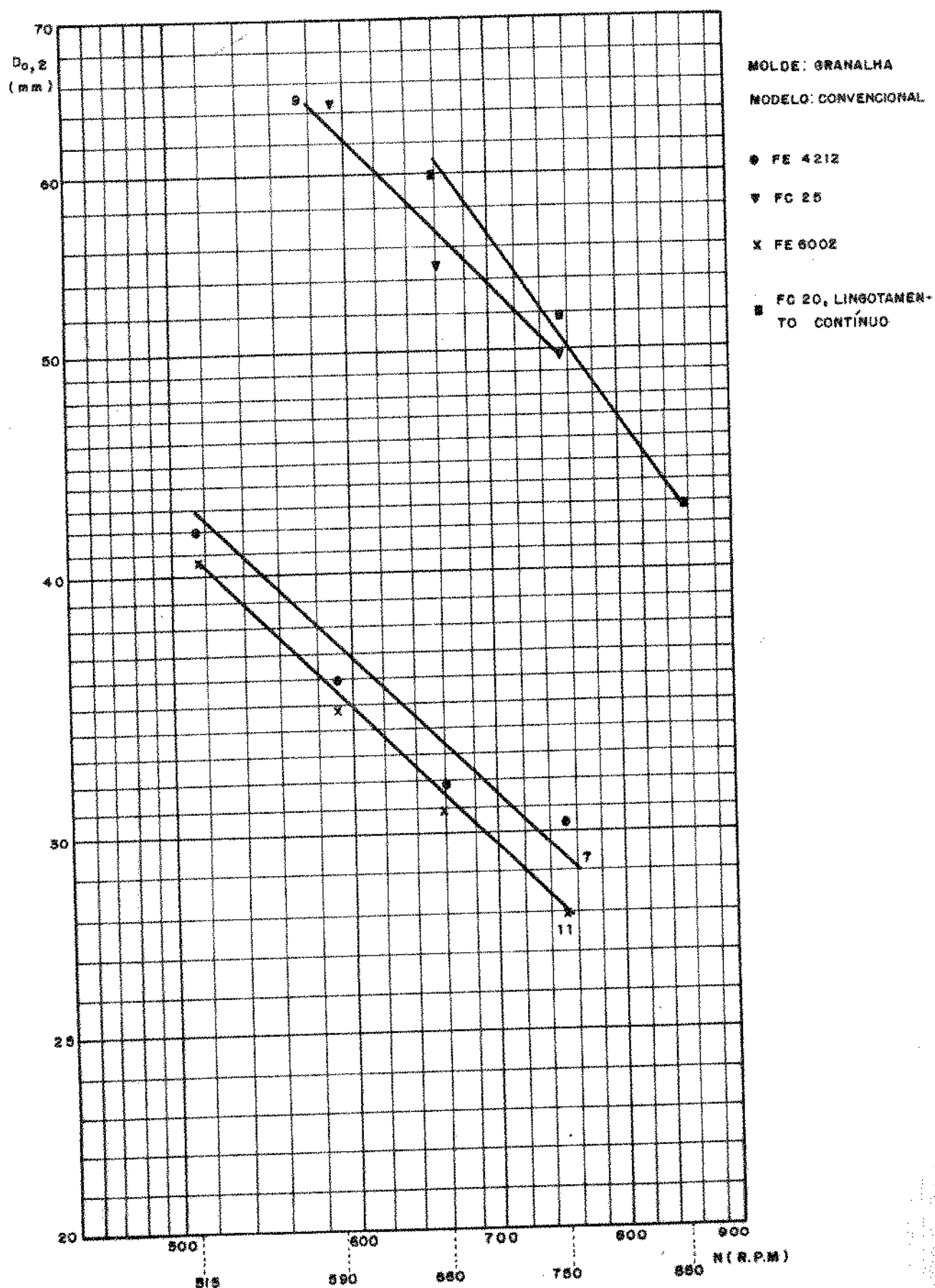


FIG. (II.7) VARIAÇÃO DO DIÂMETRO USINADO $D_{0,2}$ EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO N DOS FE 4212, FE 6002 E FC 25
CONDIÇÕES: FIXADO: MOLDE DE GRANALHA E MODELO CONVENCIONAL
PARAMETRIZADO: MATERIAL USINADO

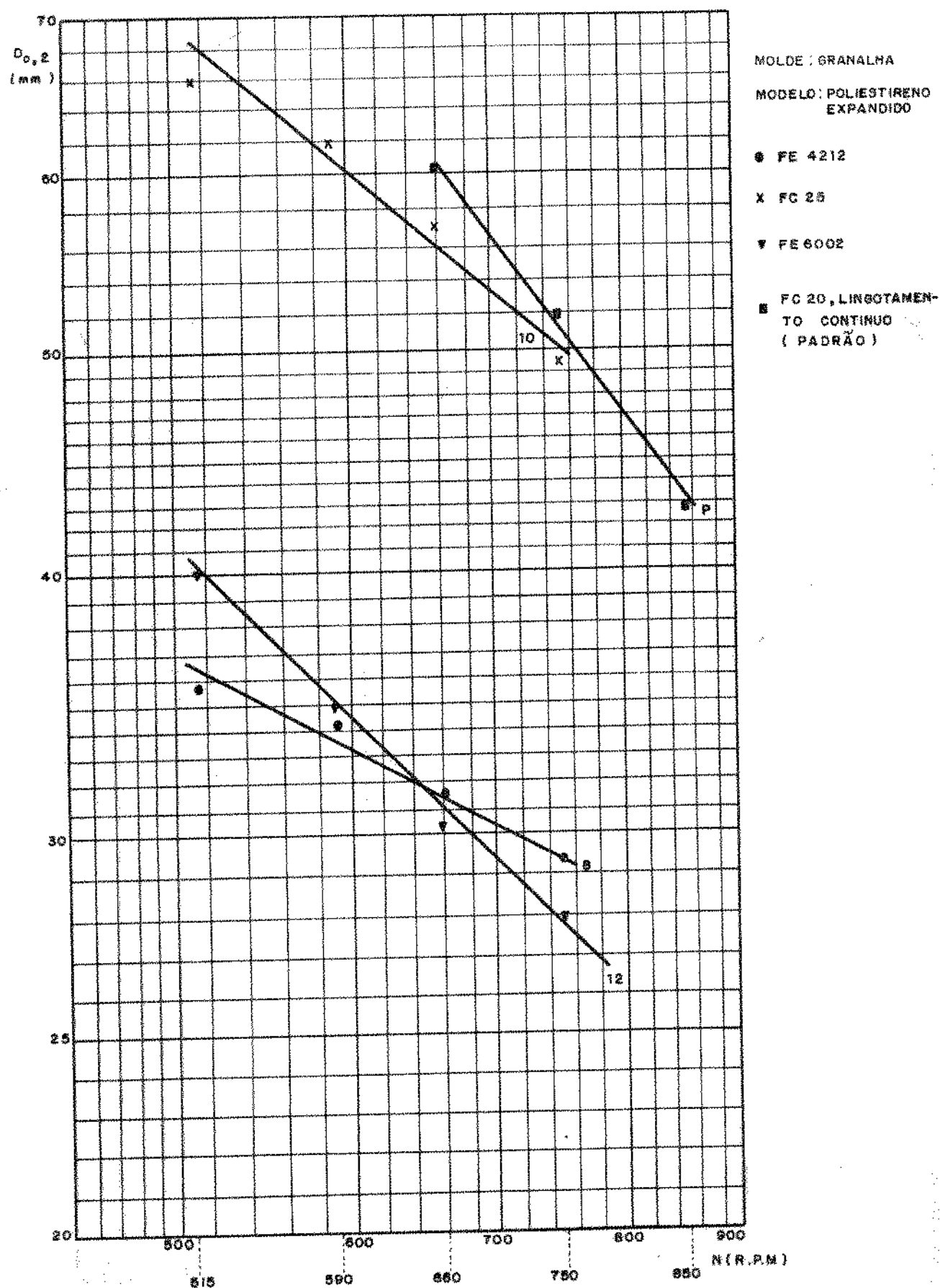


FIG. (II. 8) VARIAÇÃO DO DIÂMETRO USINADO $D_{0,2}$ EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO N
 DOS FE 4212, FE 6002 E FC 25
 CONDIÇÕES : FIXADO : MOLDE DE GRANALHA E MODELO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO
 PARAMETRIZADO : MATERIAL USINADO

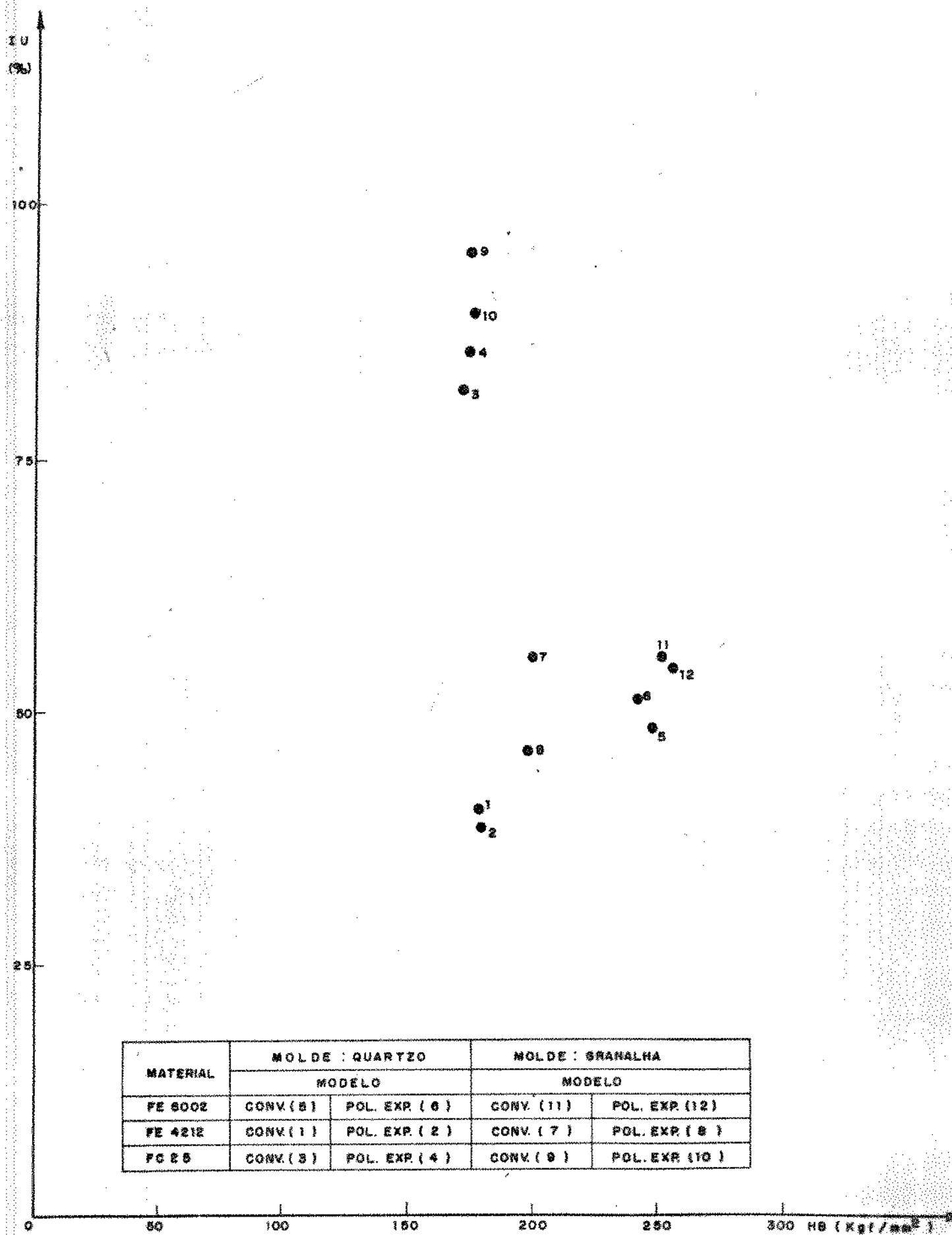


FIG. (II , 9) VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE USINABILIDADE NA OPERAÇÃO DE TORNEAMENTO DE FACEAMENTO COM A DUREZA BRINELL DOS FERROS FE 4212 , FE 6002 E FC 25

MATERIAIS: FE4212, FE6002 e FC25										n = 515 R.P.M.			a = 0,021 mm/rot.			p = 1,0 mm		
MATERIAL		Tempo de usinagem (seg.)			Média \overline{T}	Queima da ferramenta (D_w)			Média $\overline{D_w}$	Desvio Padrão $\overline{S_w}$	Diâmetro usinado ($D_{0,2}$ mm)			Média $\overline{D_{0,2}}$	Desvio Padrão $\overline{S_{0,2}}$			
NOMENCLATURA	PROCESSO	1º	2º	3º		1º	2º	3º			1º	2º	3º					
FE4212	quartzo conven.	76,0	71,1	80,0	77,7	35,9	36,5	36,9	36,43	0,50	29,4	30,1	30,7	30,07	0,65			
	quartzo pol.exp.	80,1	76,1	76,2	77,47	36,8	35,65	35,7	35,80	0,20	30,0	28,65	29,97	29,55	0,70			
	granalha conven.	105,8	106,0	105,0	105,6	46,45	47,70	46,4	46,85	0,74	42,4	42,5	41,1	42,0	0,78			
	granalha pol.exp.	94,5	92,7	87,1	91,43	42,0	41,6	39,6	41,07	1,20	37,0	35,3	35,0	35,80	1,00			
	quartzo conven.	164,0	160,0	153,7	159,2	68,90	68,2	64,50	67,2	2,00	63,10	60,7	59,9	61,0	1,50			
FC25	quartzo pol.exp.	154,4	161,0	169,4	161,6	66,15	67,7	69,6	67,82	1,50	61,7	63,7	64,2	63,2	1,30			
	granalha conven.	Com essa rotação não houve a medida de desgaste de 0,2 mm na ferramenta																
	granalha pol. exp.	171,4	171,5	175,0	172,6	71,3	-	-	71,3	-	62,45	65,35	71,1	66,3	4,00			
	quartzo conven.	90,4	90,0	90,2	90,2	40,85	40,80	40,82	40,82	0,02	36,4	35,75	36,0	36,05	0,32			
	quartzo pol.exp.	98,0	91,7	94,8	94,85	45,1	42,25	43,60	43,65	1,40	38,0	37,65	37,80	37,80	0,17			
FE6002	granalha conven.	97,8	102,9	101,4	100,7	45,35	45,85	45,4	45,54	0,27	40,0	41,25	40,6	40,62	0,62			
	granalha pol.exp.	100,0	95,0	103,2	99,4	43,87	43,1	45,8	44,25	1,30	39,8	39,5	40,7	40,0	0,62			
	função contínua	Com essa rotação a ferramenta não apresentou o desgaste de 0,2 mm																

TABELA II.1.1 - Dados experimentais dos ensaios de usinabilidade na operação de faceamento. Rotação: 515 R.P.M.

MATERIAIS: FE4212, FE6002 e FC25 n = 590 R.P.M. a = 0,021mm/rot. p 2 1,0mm															
MATERIAL		Tempo de usina- gem (seg.)			Média \bar{T}	Queima da fer- ramenta (D_w)			Média \bar{D}_w	Desvio padrão \bar{S}_w	Diâmetro usinado ($D_{0,2}$ mm)			Média $\bar{D}_{0,2}$	Desv. Pad. $\bar{S}_{0,2}$
Nomen- clatura	Processo	1º	2º	3º		1º	2º	3º			1º	2º	3º		
FE4212	quartzo conven.	67,0	71,0	66,0	68,0	34,40	34,5	34,3	34,5	0,1	29,5	30,1	27,0	28,86	1,50
	quartzo pol.exp.	63,2	65,8	60,8	63,30	32,65	34,5	31,6	32,92	1,4	26,2	27,2	25,9	26,43	0,63
	granalha conven.	83,7	86,4	82,2	84,1	41,2	42,7	40,7	41,53	0,78	35,65	36,43	36,00	36,04	0,39
	granalha pol. exp.	79,9	82,6	77,8	80,1	39,8	41,75	38,22	39,92	1,70	34,4	35,73	33,25	34,46	1,10
	quartzo conven.	120,8	126,4	127,8	125,0	57,8	60,35	60,27	59,47	1,40	52,65	54,4	54,88	53,97	1,10
FC25	quartzo conven.	126,8	131,4	131,0	129,7	60,55	60,80	61,32	60,89	0,39	55,65	56,1	55,97	55,90	0,23
	quartzo pol.exp.	145,0	149,0	150,0	148,0	69,0	69,2	70,0	69,43	0,44	64,0	65,27	65,62	64,96	0,85
	granalha conven.	148,5	143,8	149,1	147,13	68,55	69,0	68,9	68,8	0,23	62,0	61,3	63,21	62,17	0,95
	quartzo conven.	85,7	77,8	73,8	79,10	39,3	35,3	37,67	37,42	2,00	32,85	31,80	32,25	32,3	0,33
	quartzo pol.exp.	77,0	76,0	76,2	76,4	39,1	38,77	38,50	38,79	0,30	33,72	33,30	33,55	33,52	0,21
FE6002	granalha conven.	82,1	82,0	73,2	79,07	40,2	40,75	38,65	39,87	1,08	36,0	35,4	34,3	35,23	0,86
	granalha pol.exp.	85,8	80,0	81,2	82,3	43,2	40,70	40,5	41,47	1,50	35,47	35,1	33,72	34,76	0,90
	Fundição contínua	Com esta rotação a ferramenta não apresentou o desgaste de 0,2 mm													

TABELA II.2 - Dados experimentais dos ensaios de usinabilidade na operação de faceamento. Rotação: 590 R.P.M..

MATERIAL: FE4212, FE6002 e FC25 n = 660 R.P.M. a = 0,021 mm/rot. p = 1,0 mm																		
MATERIAL		Tempo de usinagem (seg.)			Média \bar{T}	Queima da ferramenta (D_w)			Média \bar{D}_w	Desvio padrão \bar{S}_w	Diâmetro usinado ($D_{0,2}$ mm)			Média $\bar{D}_{0,2}$	Desvio padrão $\bar{S}_{0,2}$			
Nomenclatura	Processo	1º	2º	3º		1º	2º	3º			1º	2º	3º					
FE4212	quartzo conven.	51,8	54,1	55,2	53,70	27,8	31,65	32,0	30,5	2,30	26,1	26,85	27,30	26,75	0,60			
	quartzo pol.exp.	52,8	49,8	47,2	49,86	32,0	31,5	29,1	30,4	1,50	25,7	25,0	22,0	24,23	1,90			
	granalha conven.	63,0	65,9	65,0	63,6	35,0	36,7	37,0	36,23	1,00	32,1	32,5	32,2	32,30	0,28			
	granalha pol.exp.	62,0	70,2	61,8	64,7	36,80	36,85	35,0	36,21	1,05	31,55	32,35	31,45	31,70	0,50			
	quartzo conven.	96,8	91,7	99,4	95,97	53,2	50,65	54,0	52,6	1,70	49,47	44,15	49,5	47,7	3,00			
FC25	quartzo pol.exp.	99,5	102,0	100,2	100,57	55,05	56,5	55,0	55,5	0,85	50,05	51,4	49,4	50,28	1,00			
	granalha conven.	112,5	109,2	110,0	110,57	61,0	59,0	59,3	59,77	1,07	56,9	54,1	55,6	55,50	1,45			
	granalha pol.exp.	118,4	116,5	119,2	118,03	62,0	63,2	63,2	62,87	0,75	56,45	58,3	58,1	57,60	1,01			
	quartzo conven.	54,8	67,5	61,0	61,15	31,1	33,0	32,0	32,05	0,95	25,8	31,1	28,0	28,40	2,60			
	quartzo pol.exp.	57,0	58,6	57,8	57,8	34,46	34,5	34,5	34,48	0,02	30,5	29,55	30,0	30,01	0,47			
FE6002	granalha conven.	55,0	61,0	48,4	55,13	35,1	36,9	36,0	36,0	0,9	30,8	31,8	31,3	31,30	0,90			
	granalha pol. exp.	55,8	63,2	60,5	51,8	34,8	36,65	36,0	35,8	0,94	29,2	31,4	31,2	30,4	1,11			
	função contínua	147,1	153,8	148,8	150,0	75,22	-	-	75,22	-	60,7	59,43	60,07	60,06	0,63			

TABELA II.3 - Dados experimentais dos ensaios de usinabilidade na operação de faceamento. Rotação: 660 R.P.M.

MATERIAIS: FE4212, FE6002 e FC25															n = 750 R.P.M.			a = 0,021 mm/rot.			p = 1,0 mm		
MATERIAL		Tempo de usinagem (seg.)			Média \bar{T}	Queima da ferramenta (\bar{D}_w)			Média \bar{D}_w	Desvio Padrão \bar{D}_w	Diâmetro usinado ($\bar{D}_{0,2}$ mm)			Média $\bar{D}_{0,2}$	Desvio padrão $\bar{S}_{0,2}$								
Nomenclatura	Processo	1º	2º	3º		1º	2º	3º			1º	2º	3º										
FE4212	quartzo conven.	45	44	44,2	44,4	28,6	28,3	28,5	28,5	0,15	25,0	21,35	23,0	23,17	1,8								
	quartzo pol.exp.	40,7	41,8	41,1	41,2	26,50	28,3	27,1	27,3	0,91	21,8	23,5	26,6	22,63	0,8								
	granalha conven.	56,3	55,0	55,1	55,47	33,1	35,0	34,0	33,7	1,47	31,8	31,9	28,1	30,6	2,1								
	granalha pol.exp.	54	53,4	53,7	53,7	33,40	34,0	33,5	33,6	0,32	29,8	29,8	29,0	29,5	0,46								
	quartzo conven.	78,8	82,6	80,1	80,5	46,45	48,5	47,01	47,32	1,05	42,5	45,8	43,7	44,0	1,67								
FC25	quartzo pol.exp.	81,2	82,0	81,3	81,5	48,45	50,25	49,2	49,3	0,90	44,70	45,65	45,0	45,1	0,5								
	granalha conven.	94	89	91,0	91,3	56,6	54,0	55,0	55,2	1,31	50,2	49,5	50,0	49,9	0,4								
	granalha pol.exp.	90,2	95,6	92,0	92,6	54,80	57,25	56,0	56,0	1,22	49,4	52,25	49,6	50,2	1,7								
	quartzo conven.	46,2	46,1	46,0	46,1	31,65	32,1	31,8	31,85	0,22	27,1	27,0	25,6	26,5	0,3								
	quartzo pol.exp.	48,0	44,6	45,0	68,8	30,0	28,7	29,2	29,3	0,65	27,13	25,85	28,0	27,0	1,08								
FE6002	granalha conven.	51,2	49,8	52,1	51,27	33,75	33,5	34,1	33,45	0,84	28,0	26,0	30,0	28,0	2,0								
	granalha pol. exp.	49,0	50,5	50,0	49,8	34,7	31,45	32,8	33,0	1,63	29,0	28,15	26,5	27,8	1,27								
	função contínua	96,8	101,2	98,0	98,7	55,3	60,1	57,5	57,6	2,40	53,2	50,0	52,0	51,7	1,6								

TABELA II.4 - Dados experimentais dos ensaios de usinabilidade na operação de faceamento. Rotação: 750 R.P.M.

MATERIAIS: FE4212, FE6002 e FC25									
		a = 0,021 mm/rot.		P = 1,0 mm					
MATERIAL		Rotação: 515 R.P.M. $D_{0,2}$ (médio)	Rotação: 590 R.P.M. $D_{0,2}$ (médio)	Rotação: 660 R.P.M. $D_{0,2}$ (médio)	Rotação: 750 R.P.M. $D_{0,2}$ (médio)	I.U.% $\frac{D_{350}^E}{D_{350}} \cdot 100$	coef. ang. m	coef. correl. r	constan- te lgK
Nomen- clatura	Processo								
FE4212	quartzo conve.	30,07	28,86	26,75	23,17	40,30	0,689	0,962	3,37
	quartzo pol.exp.	29,55	26,43	24,23	22,60	38,50	0,719	0,995	3,41
	granalha conv.	42,00	36,04	32,30	30,6	55,30	0,940	0,994	4,16
	granalha pol.exp.	35,80	34,46	31,70	29,5	46,20	0,530	0,985	4,16
	quartzo conv.	61,00	53,97	47,70	44,0	82,0	0,88	0,995	4,16
FC25	quartzo	63,20	55,90	50,28	45,1	85,0	0,9016	0,999	4,24
	pol.exp.	-	64,96	55,50	50,0	95,10	1,08	0,988	4,78
	granalha conven.	66,3	62,17	57,60	49,6	89,40	0,762	0,976	3,908
	granalha pol.exp.	36,05	32,30	28,40	26,5	48,20	0,846	0,992	3,83
	quartzo conv.	37,80	33,52	30,01	27,0	50,70	0,902	0,999	4,02
FE6002	quartzo	40,62	35,23	31,30	28,0	55,50	0,995	0,998	4,30
	granalha conven.	40,00	34,76	30,40	27,8	54,50	0,987	0,995	4,22
	granalha pol.exp.	660 R.P.M.: 60,06($D_{0,2}$)	750 R.P.M.: 51,7($D_{0,2}$)	850 R.P.M.: 43	100		1,338	0,999	5,55
FC20	fundição contínua								

TABELA II.5 - Dados experimentais dos ensaios de usinabilidade na operação de faceamento.

A P E N D I C E I I I

RESULTADOS EXPERIMENTAIS COMPARATIVOS ENTRE OS DOIS
CRITÉRIOS DE ENSAIOS DE USINABILIDADE.

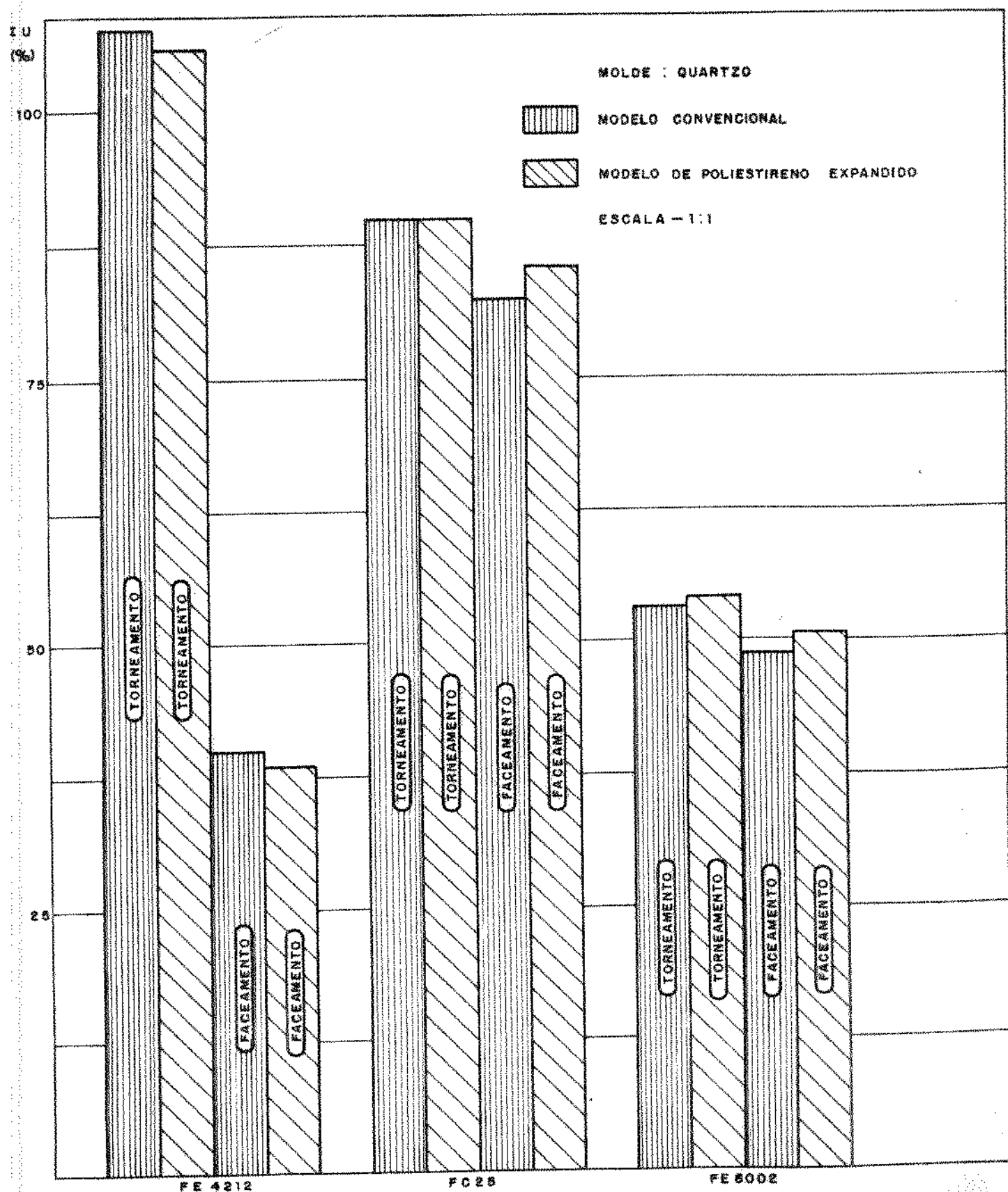


FIG. (III.1) COMPARAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE USABILIDADE BASEADOS NO AUMENTO PROGRESSIVO DA VELOCIDADE DE CORTE NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO E FACEAMENTO DE MATHON DOS FE 4212, FC 25 E FE 6002

CONDIÇÕES: FIXADO MATERIAL DO MOLDE : QUARTZO

PARAMETRIZADO O MODELO

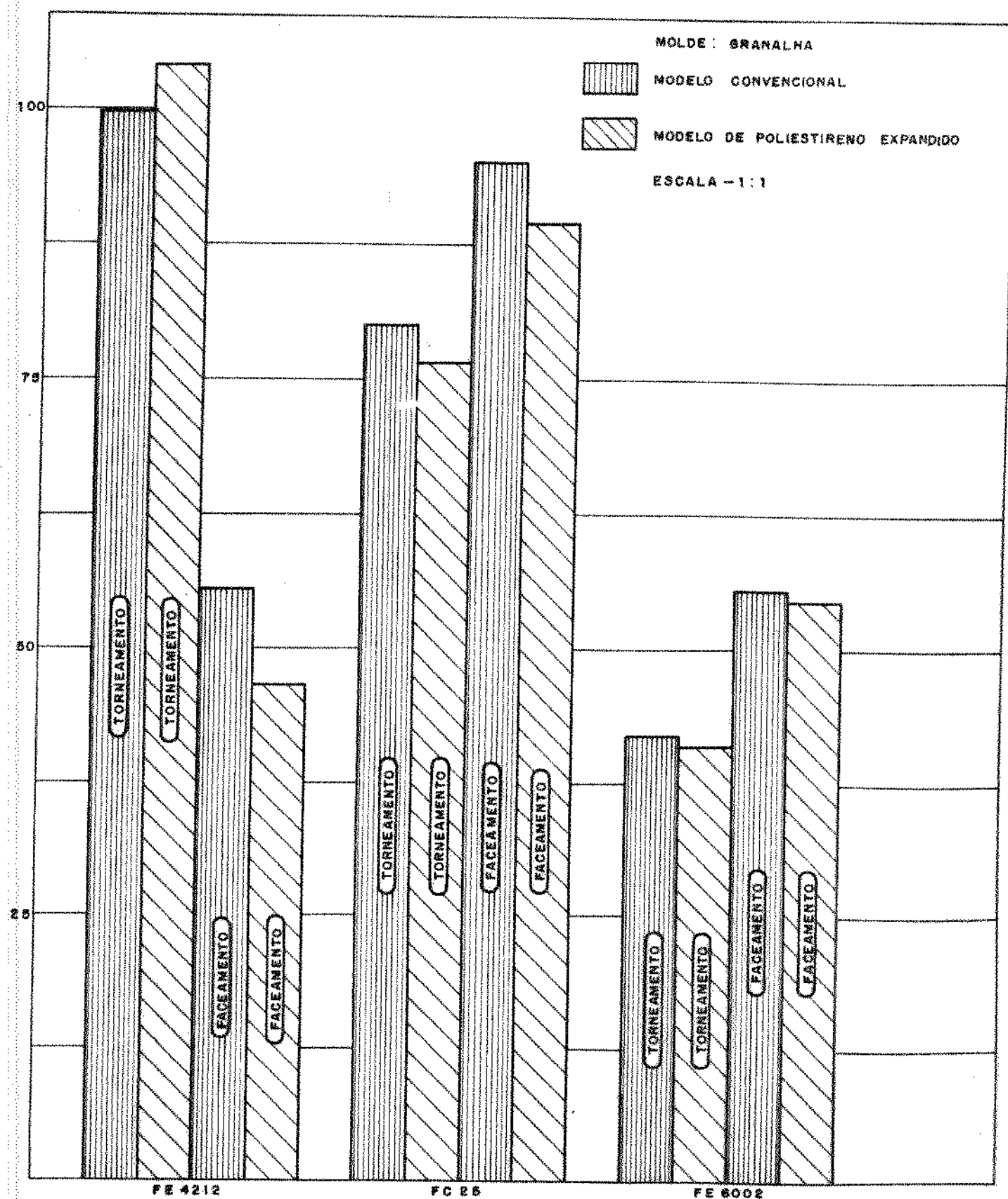


FIG. (III.2) COMPARAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE USABILIDADE BASEADOS NO AUMENTO PROGRESSIVO DA VELOCIDADE DE CORTE NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO E FACEAMENTO DE MATHON DOS FE 4212, FC 25 E FE 8002
CONDIÇÕES: FIXADO MATERIAL DO MOLDE: GRANALHA
PARAMETRIZADO O MODELO

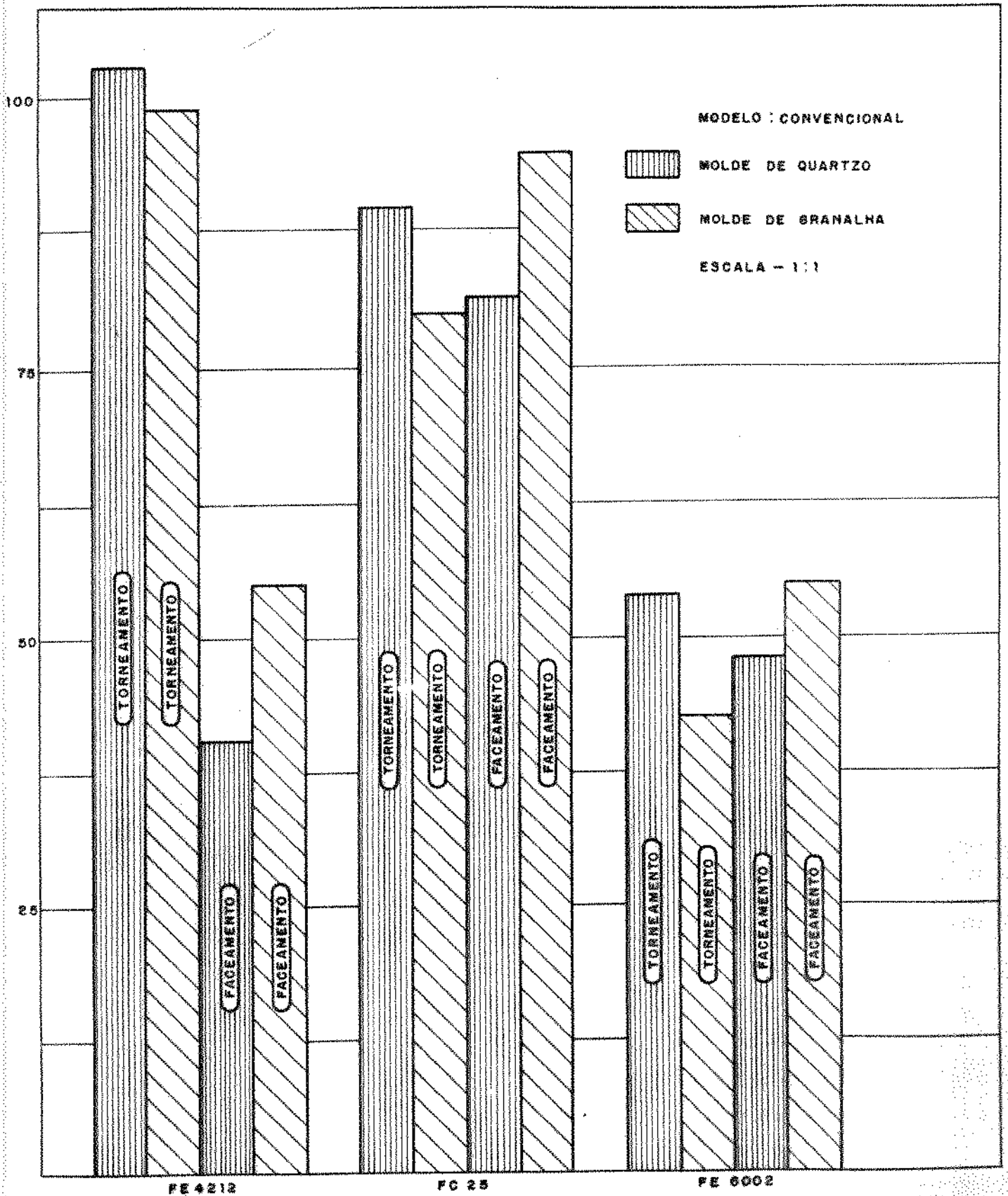


FIG. (III. 3) COMPARAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE USINABILIDADE BASEADOS NO AUMENTO PROGRESSIVO DA VELOCIDADE DE CORTE NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO E FACEAMENTO DE NATHON DOS FE 4212 , FC 25 E FE 6002
 CONDIÇÕES : FIXADO MATERIAL DO MODELO : CONVENCIONAL
 PARAMETRIZADO O MOLDE

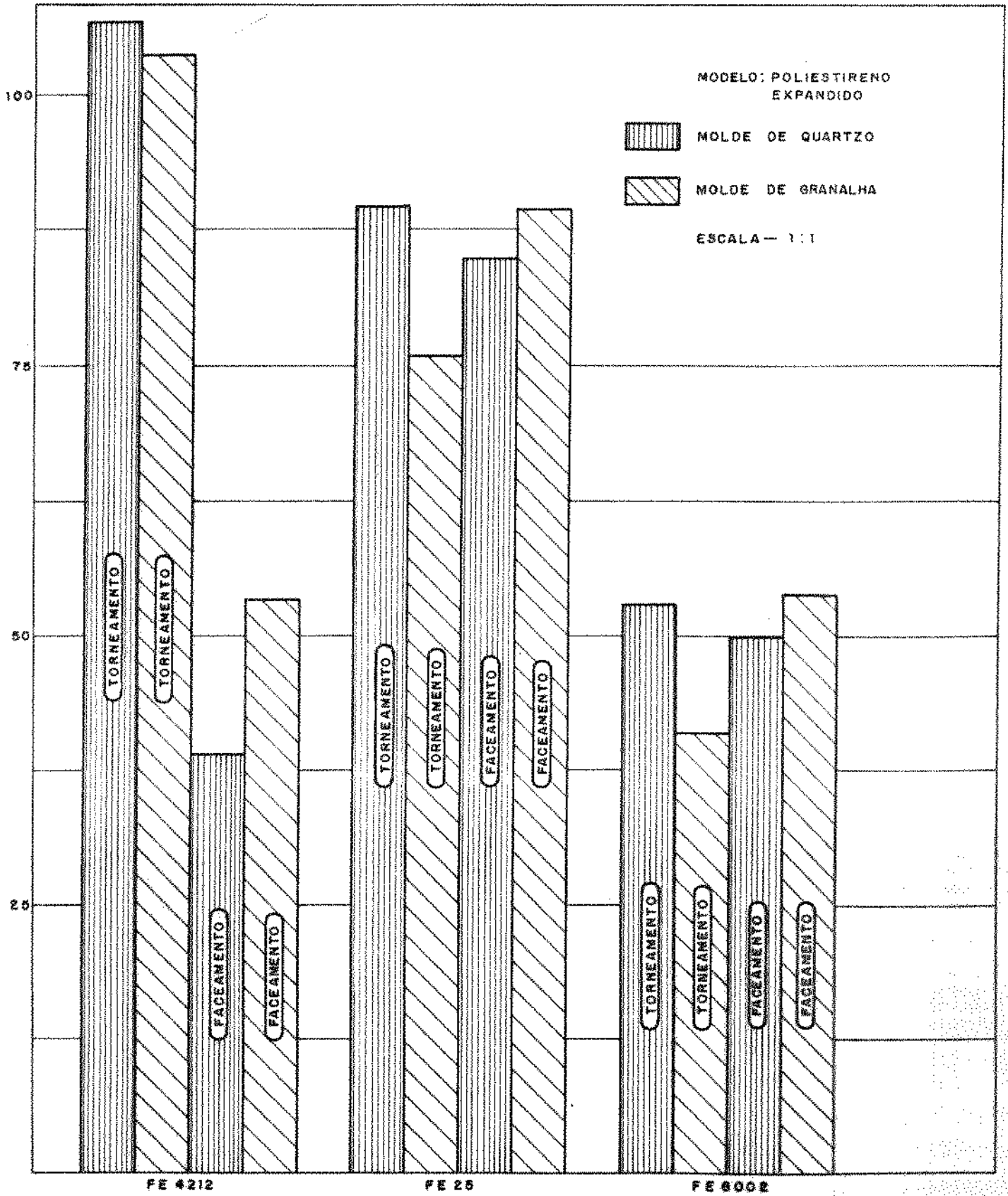


FIG. (III. 4) COMPARAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE USABILIDADE BASEADOS NO AUMENTO PROGRESSIVO DA VELOCIDADE DE CORTE NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO E FACEAMENTO DE MATHON DOS FE 4212 FE 25 E FE 6002

CONDIÇÕES: FIXADO MATERIAL DO MODELO: POLIESTIRENO EXPANDIDO

PARAMETRIZADO O MOLDE

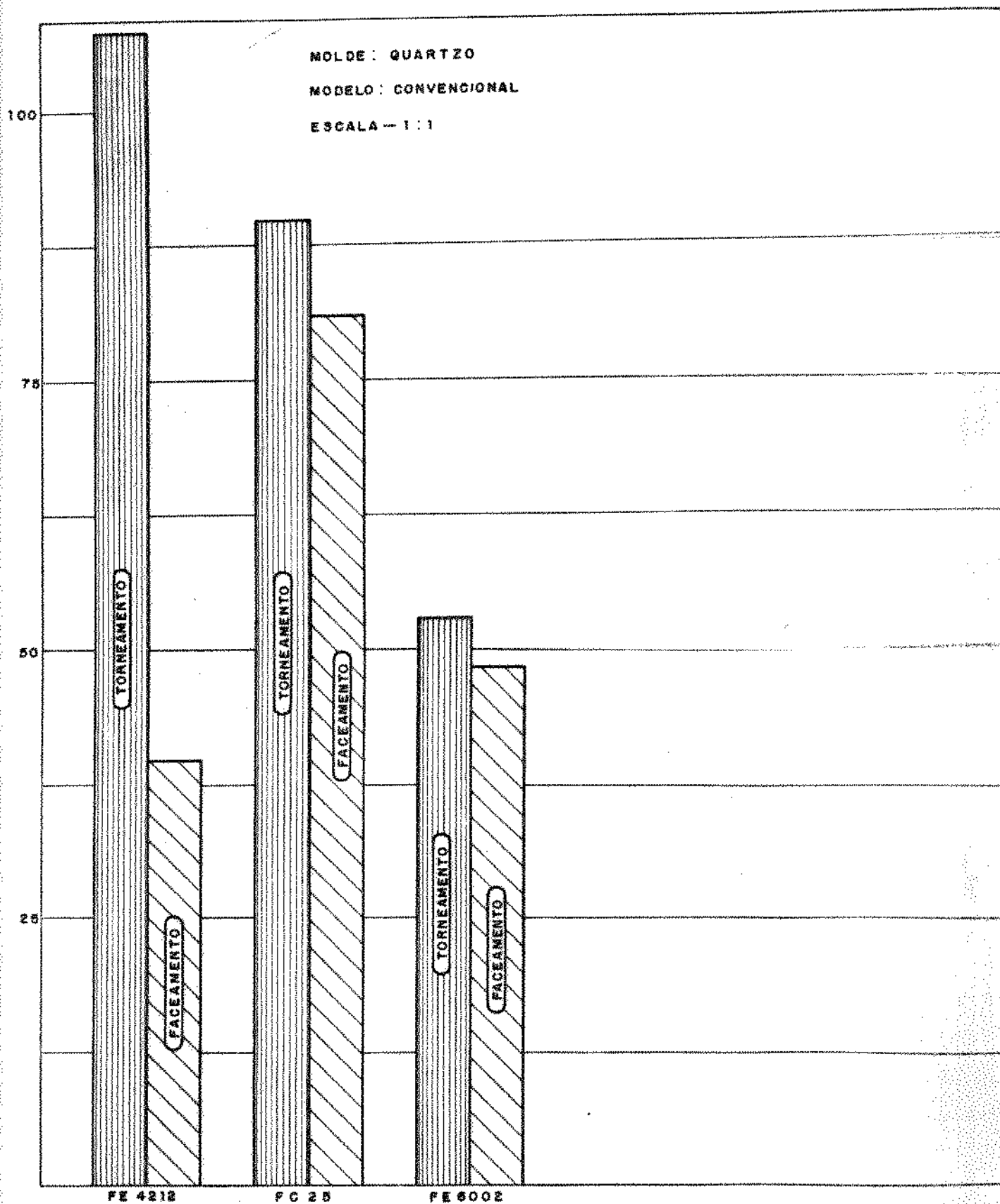


FIG. (III . 5) COMPARAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE USINABILIDADE BASEADOS NO AUMENTO PROGRESSIVO DA VELOCIDADE DE CORTE NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO E FACEAMENTO DE MATHON DOS FE 4212, FC 25 E FE 6002

CONDIÇÕES : FIXADO MATERIAL DO MOLDE : QUARTZO
 FIXADO MATERIAL DO MODELO : CONVENCIONAL

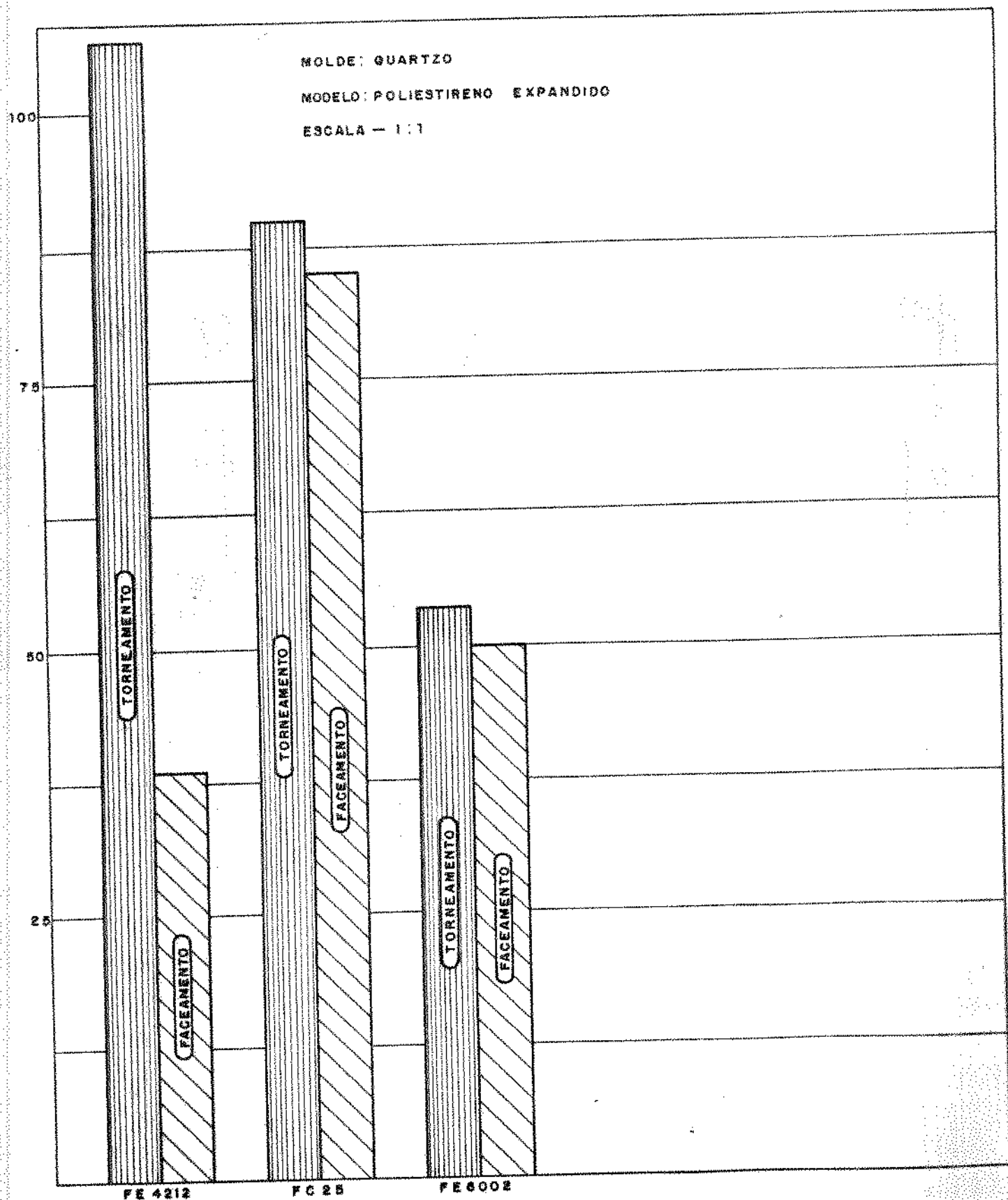


FIG. (III. 8) COMPARAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE USINABILIDADE, BASEADOS NO AUMENTO PROGRESSIVO DA VELOCIDADE DE CORTE NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO E FACEAMENTO DE MATHON DOS FE 4212, FC 25 E FE 6002

CONDIÇÕES : FIXADO MATERIAL DO MOLDE : QUARTZO
 FIXADO MATERIAL DO MODELO : POLIESTIRENO EXPANDIDO

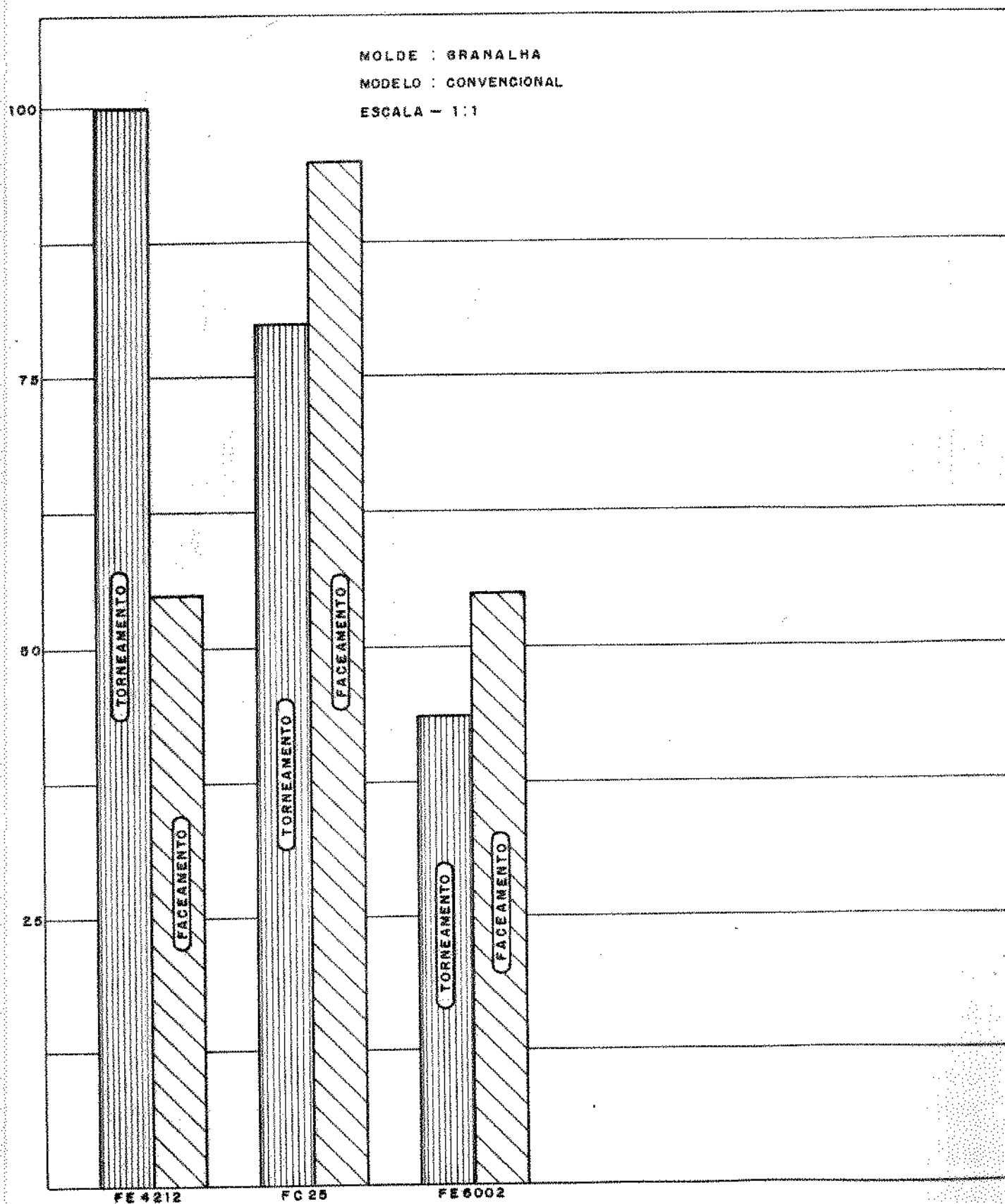


FIG. (III . 7) COMPARAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE USINABILIDADE BASEADOS NO AUMENTO PROGRESSIVO DA VELOCIDADE DE CORTE NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO E FACEAMENTO DE MATHON DOS FE 4212, FC 25 E FE 6002

CONDIÇÕES : FIXADO MATERIAL DO MOLDE : GRANALHA
 FIXADO MATERIAL DO MODELO : CONVENCIONAL

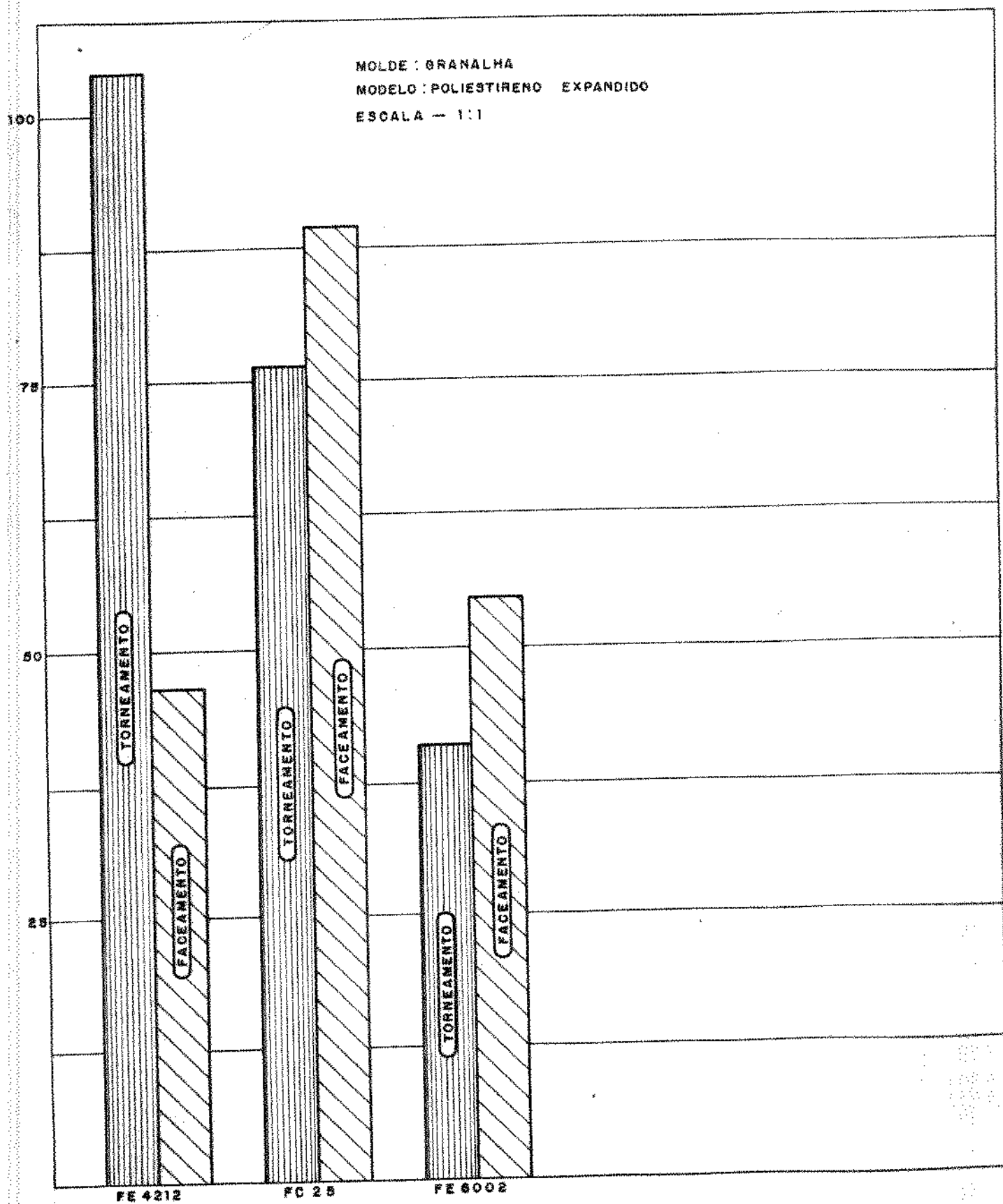


FIG. (III . 6) COMPARAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE USABILIDADE BASEADOS NO AUMENTO PROGRESSIVO DA VELOCIDADE DE CORTE NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO E FACEAMENTO DE MATHON DOS FE 4212, FC 25 E FE 6002
 CONDIÇÕES : FIXADO MATERIAL DO MOLDE : GRANALHA
 FIXADO MATERIAL DO MODELO : POLIESTIRENO EXPANDIDO

MATERIAL	MOLDE : QUARTZO		MOLDE : GRANALHA	
	MODELO		MODELO	
FE 6002	CONV. (5)	POL. EXP. (6)	CONV. (11)	POL. EXP. (12)
FE 4212	CONV. (1)	POL. EXP. (2)	CONV. (7)	POL. EXP. (8)
FC 25	CONV. (3)	POL. EXP. (4)	CONV. (9)	POL. EXP. (10)

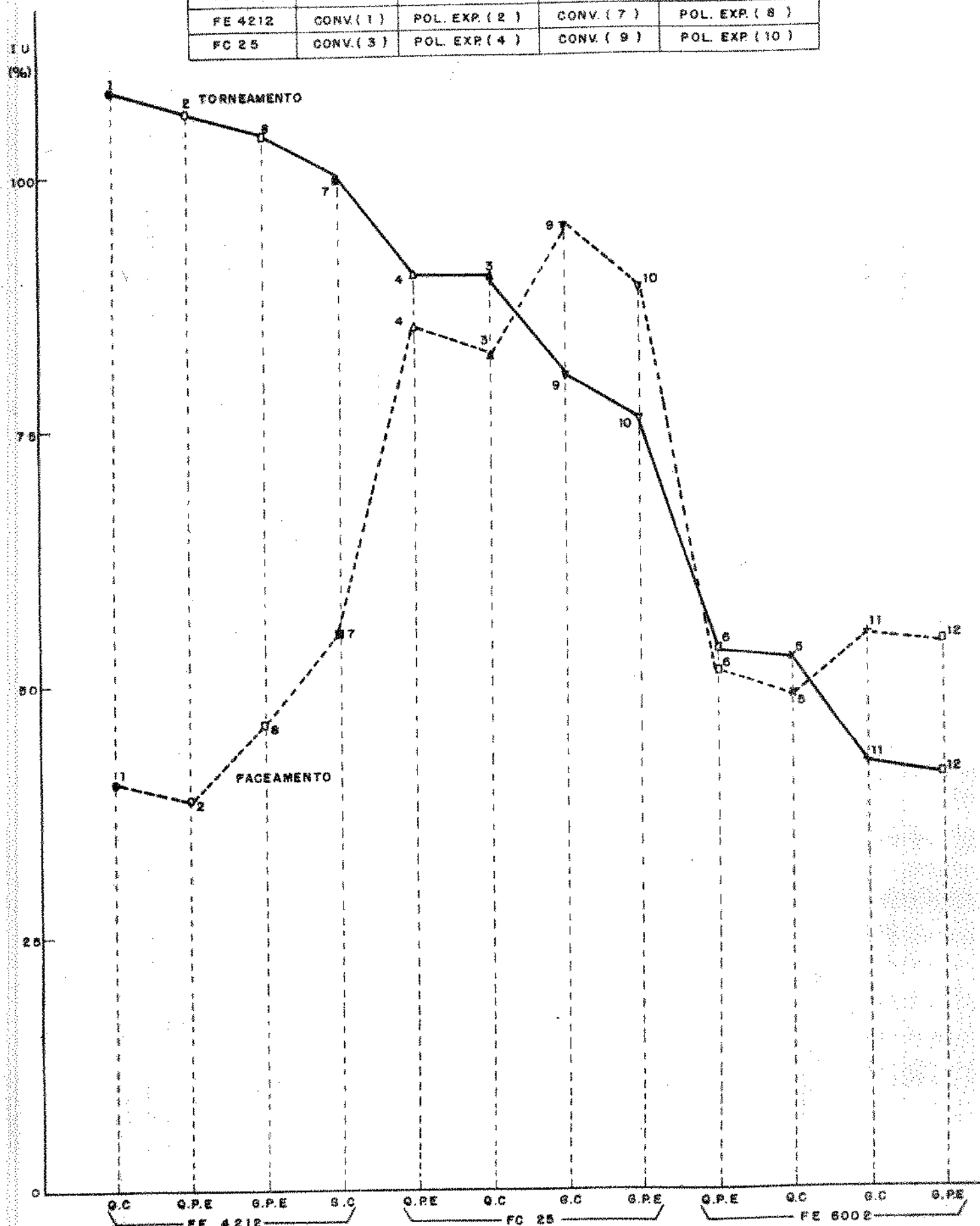


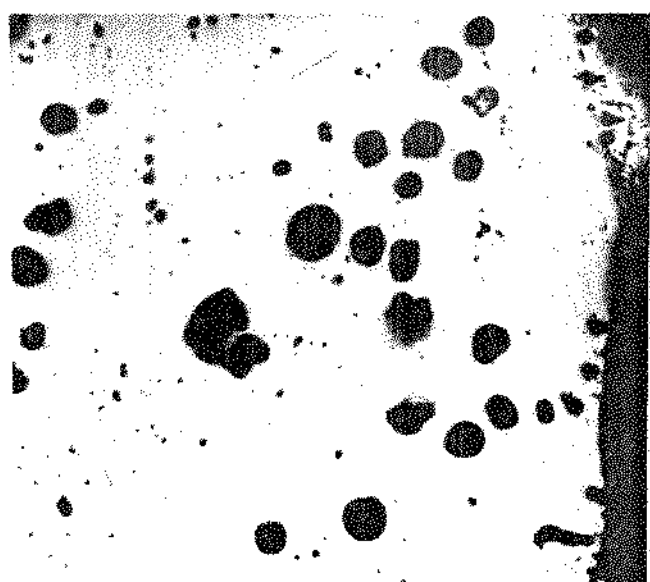
FIG. (III. 9) CORRELAÇÃO ENTRE OS DOIS MÉTODOS DE ENSAIO DE USINABILIDADE

MATERIAL		Ind. Usin. torneamento (%)	Ind.Usin. faceamento (%)	Aumento percentual comparativo (%)
Nomenclatura	Processo			
FE4212	quartzo conven.	107,75	40,3	60
	quartzo pol. exp.	106,70	38,5	62
	granalha conven.	99,31	55,34	44
	granalha pol. exp.	104,00	46,18	50
FC25	quartzo conven.	90,04	81,88	9
	quartzo pol. exp.	90,02	94,73	6
	granalha conven.	80,14	95,10	16
	granalha pol. exp.	76,40	89,50	18
FE6002	quartzo conven.	52,70	48,40	8
	quartzo pol. exp.	53,07	50,70	5
	granalha conven.	42,30	55,50	30
	granalha pol. exp.	41,10	54,50	20

TABELA III.1 - Aumento percentual comparativo entre os dois métodos de ensaio de usinabilidade.

A P Ê N D I C E I V

MICROGRAFIAS

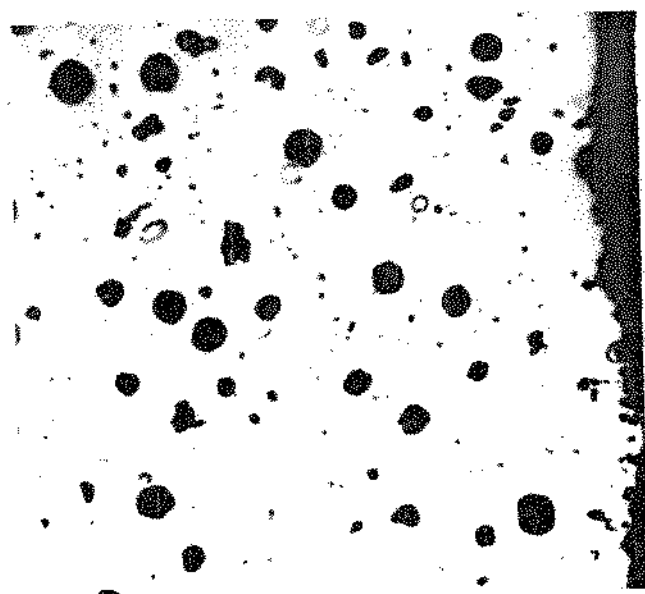


(a)

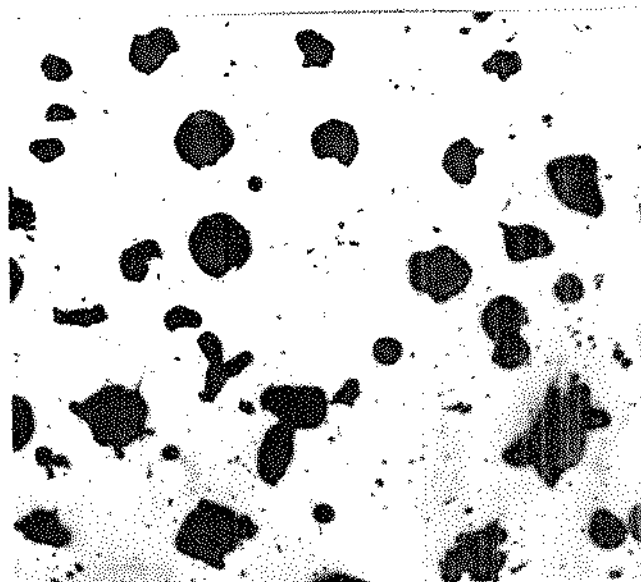


(b)

Fig. (IV.1) FE 4212 - Molde: quartzo, modelo: convencional
a) periferia b) interior, 100X s/ataque.

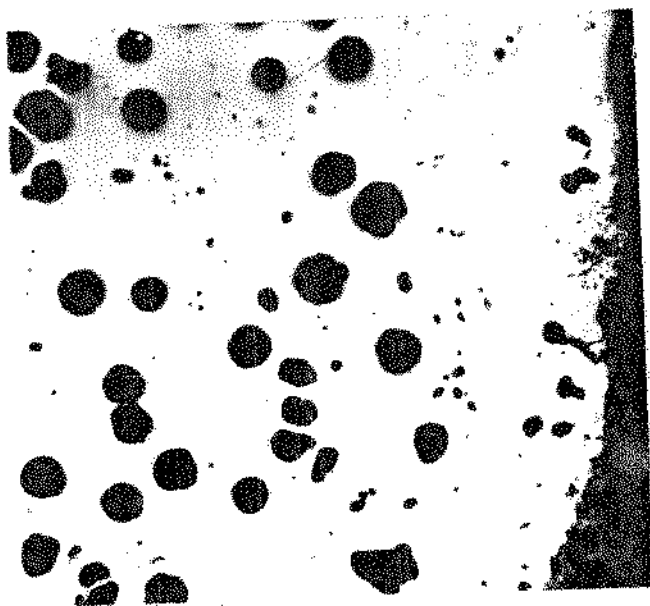


(a)

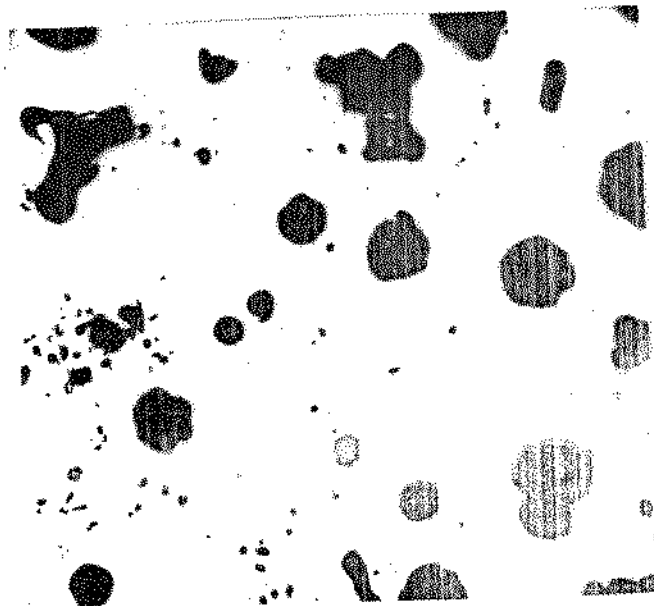


(b)

Fig. (IV.2) FE 4212 - Molde: granalha, modelo convencional.
a) periferia b) interior 100X s/ataque.

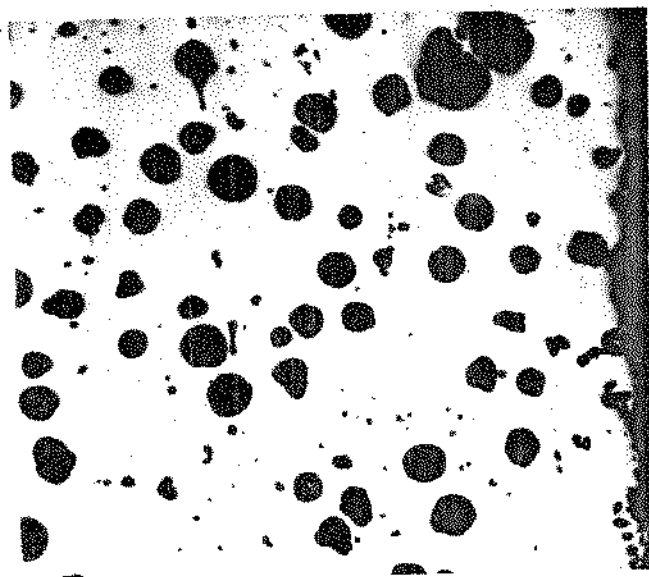


(a)



(b)

Fig. (IV.3) FE 4212 - Molde: quartzo, modelo: pol. exp.
 a) periferia b) interior 100X s/ataque.

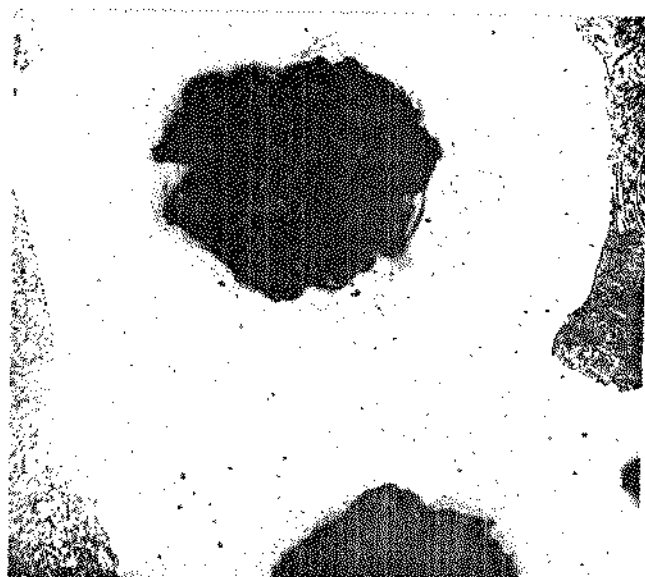


(a)

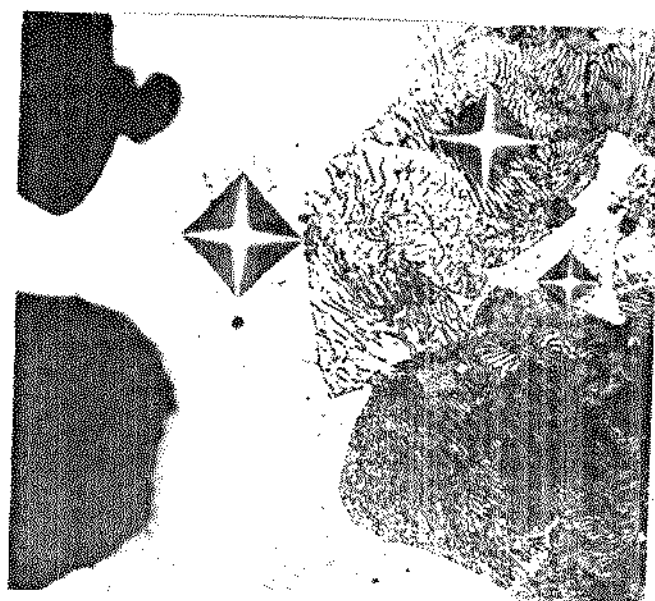


(b)

Fig. (IV.4) FE 4212 - Molde: granalha, modelo: pol. exp.
 a) periferia b) interior 100X s/ataque.



(a)

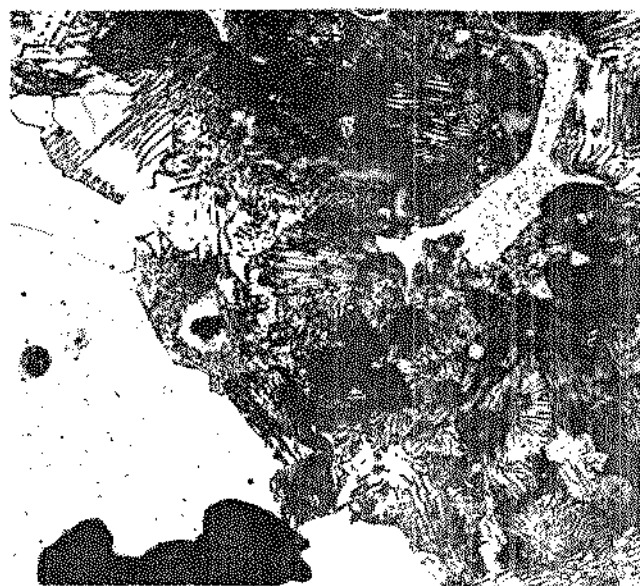


(b)

Fig.(IV.5) FE 4212 - Molde: quartzo, modelo: convencional.
a) periferia b) interior 500X nital 2%.

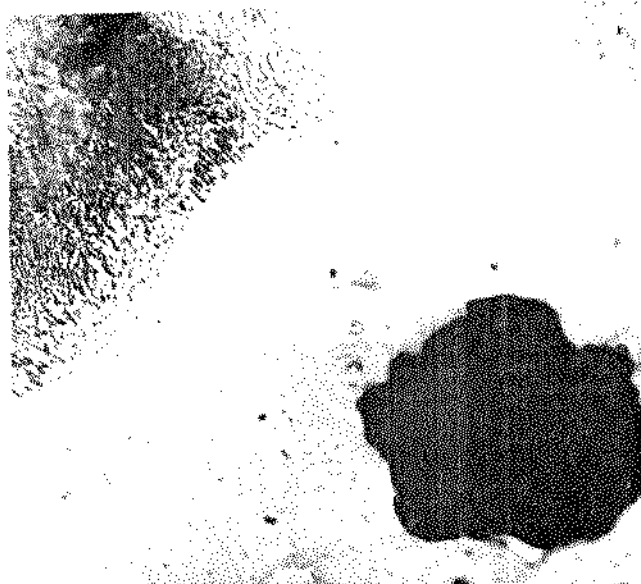


(a)

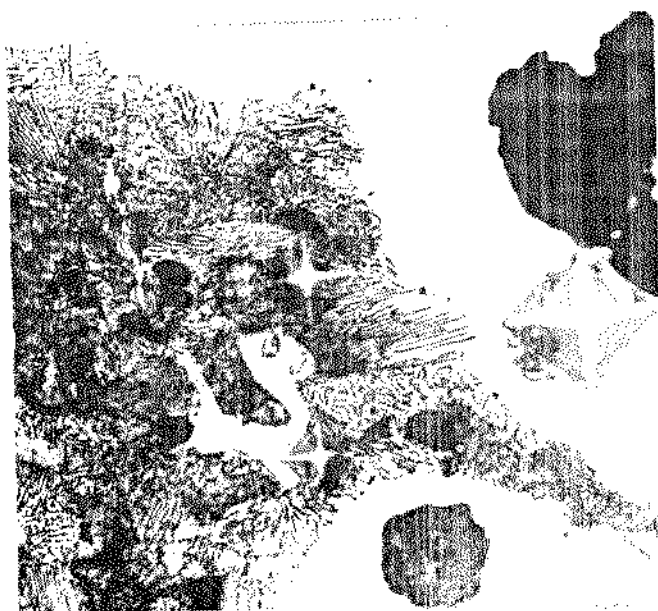


(b)

Fig.(IV.6) FE 4212 - Molde: granalha, modelo: convencional
a) periferia b) interior 500X Nital 2%.



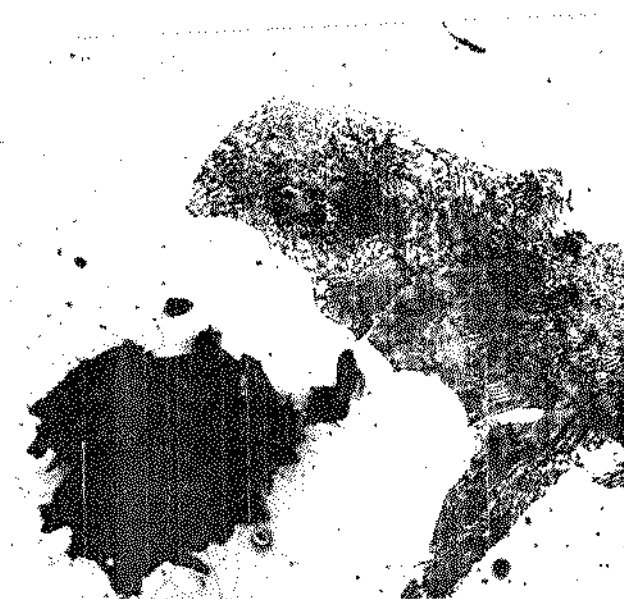
(a)



(b)

Fig. (IV.7) - FE 4212 - Molde: quartzo, modelo: pol. exp.

a) periferia b) interior 500X Nital 2%



(a)



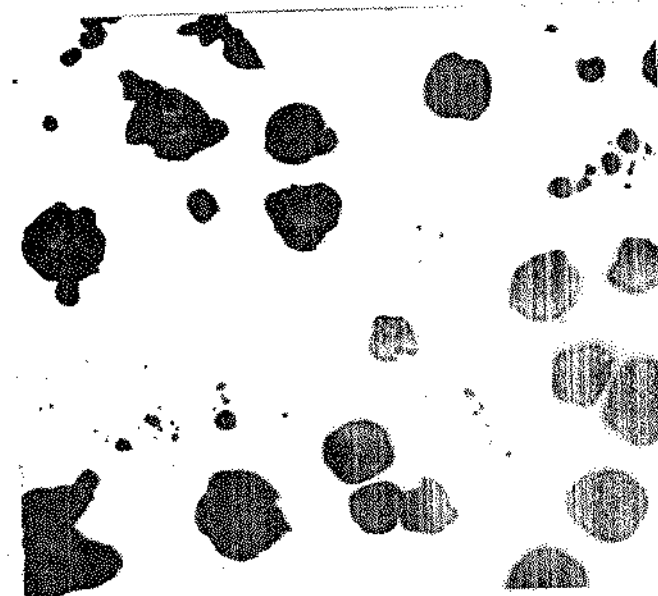
(b)

Fig.(IV.8) FE 4212 - Molde: granalha, modelo: pol. exp.

a) periferia b) interior 500X nital 2%.

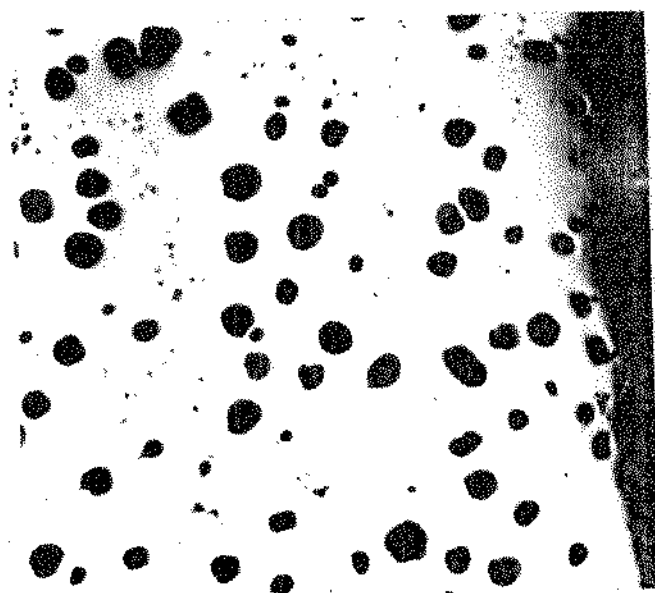


(a)

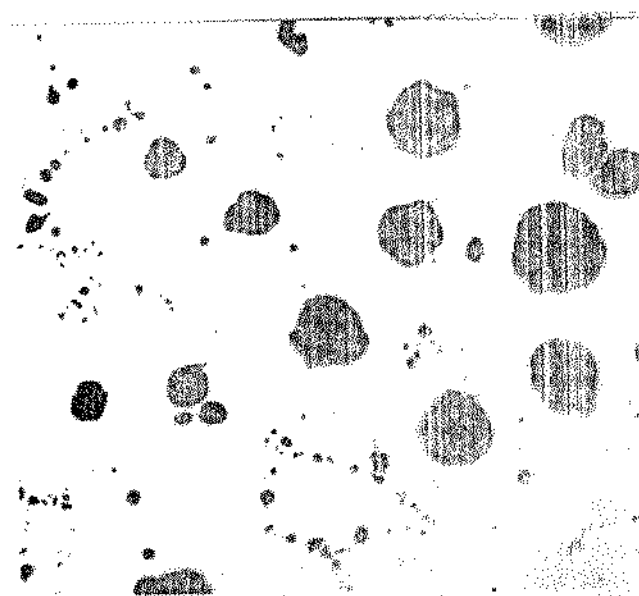


(b)

Fig. (IV.9) - FE 6002 - Molde: quartzo, modelo: convencional.
a) periferia b) interior 100X s/ataque.

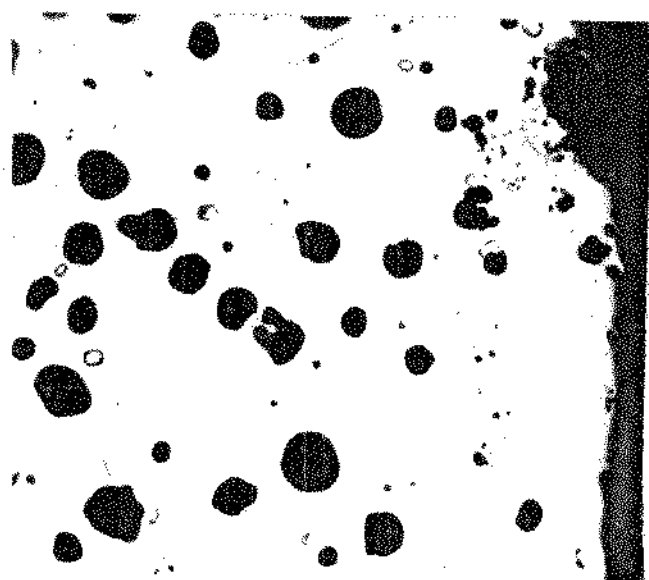


(a)

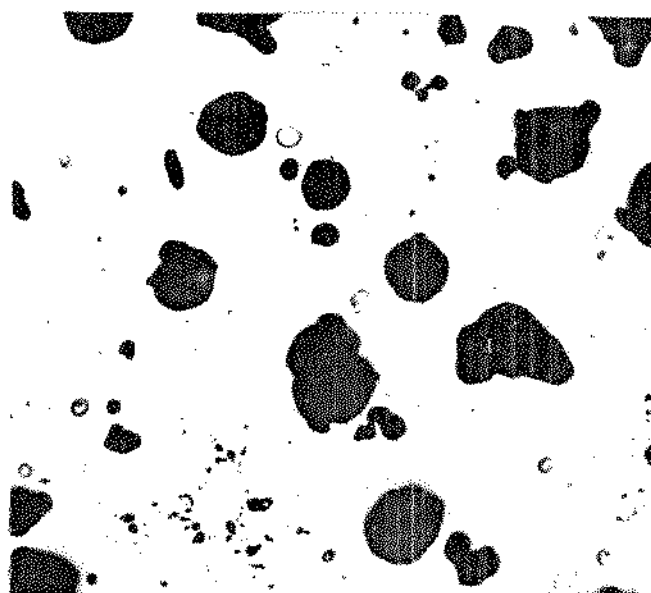


(b)

Fig. (IV.10) - FE 6002 - Molde: granalha, modelo: convencional.
a) periferia b) interior 100X s/ataque.



(a)



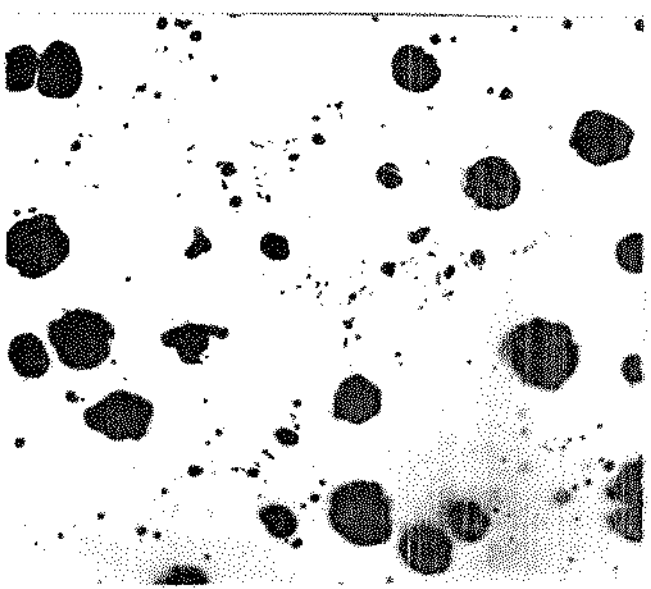
(b)

Fig. (IV.11) FE 6002 - Molde: quartzo, modelo: pol. exp.

a) periferia b) interior 100X s/ataque.



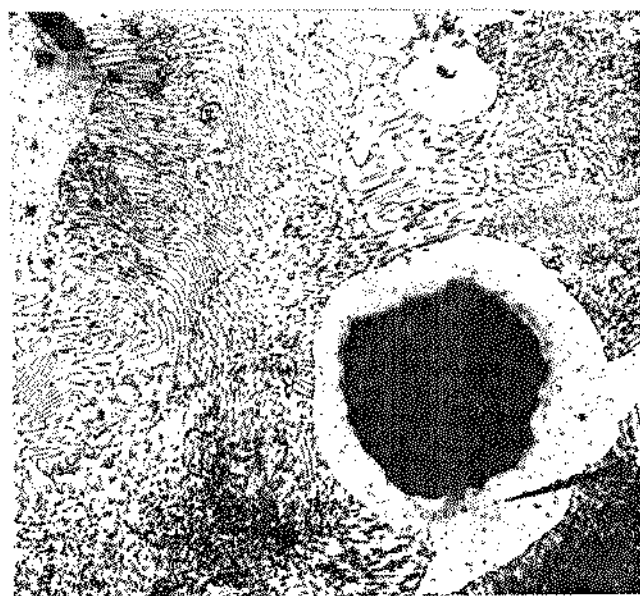
(a)



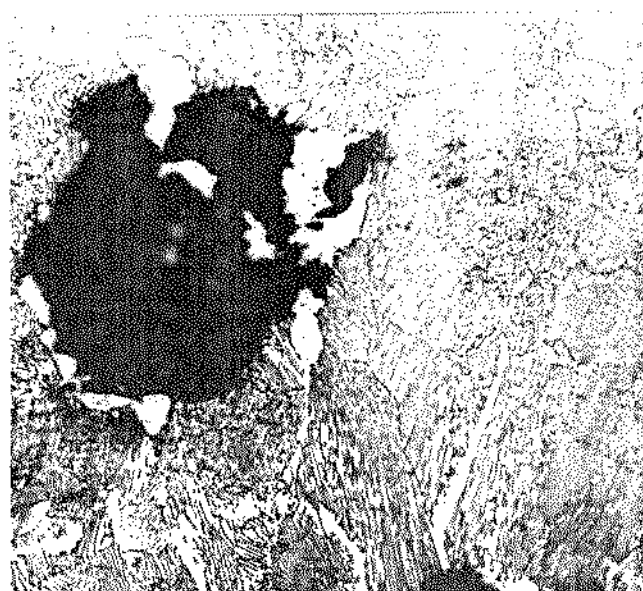
(b)

Fig. (IV.12) FE 6002 - Molde: granalha, modelo: pol. exp.

a) periferia b) interior 100X s/ataque.

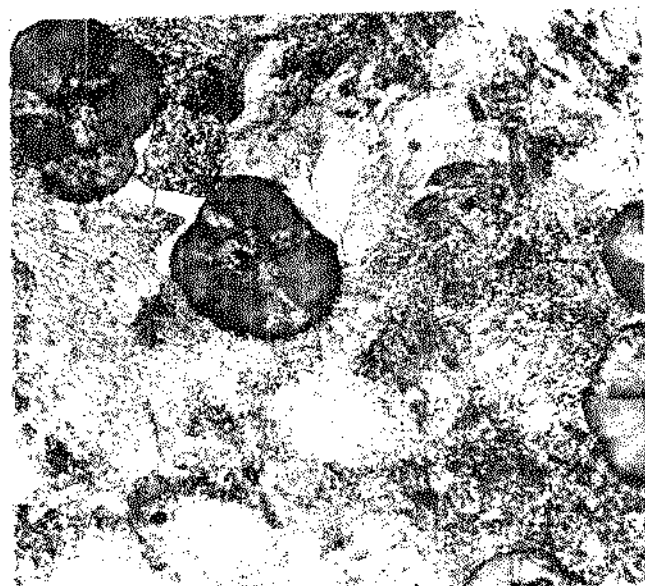


(a)

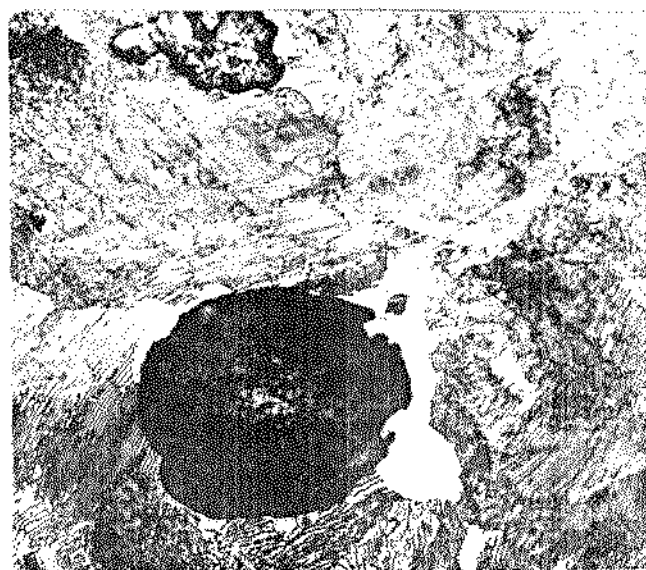


(b)

Fig. (IV.13) FE 6002 - Molde: quartzo, modelo: convencional.
a) periferia b) interior 500X Nital 2%.

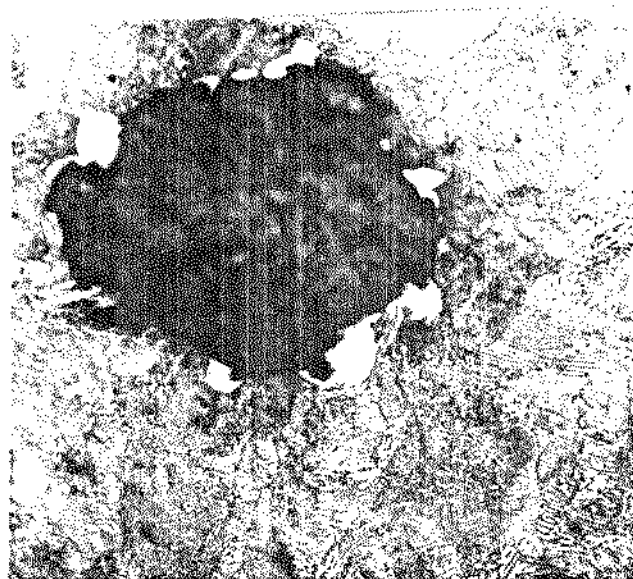


(a)

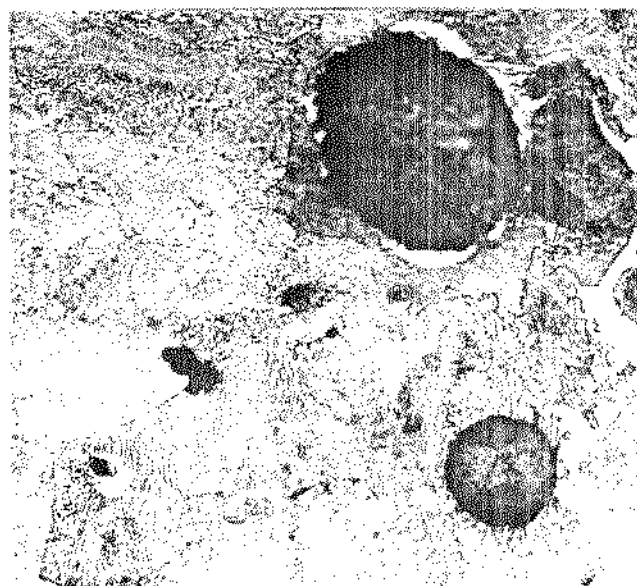


(b)

Fig. (IV.14) FE 6002 - Molde: granalha, modelo convencional.
a) periferia b) interior 500X nital 2%.



(a)



(b)

Fig. (IV.15) FE 6002 - Molde: quartzo, modelo: pol. exp.
a) periferia b) interior 500X nital 2%.

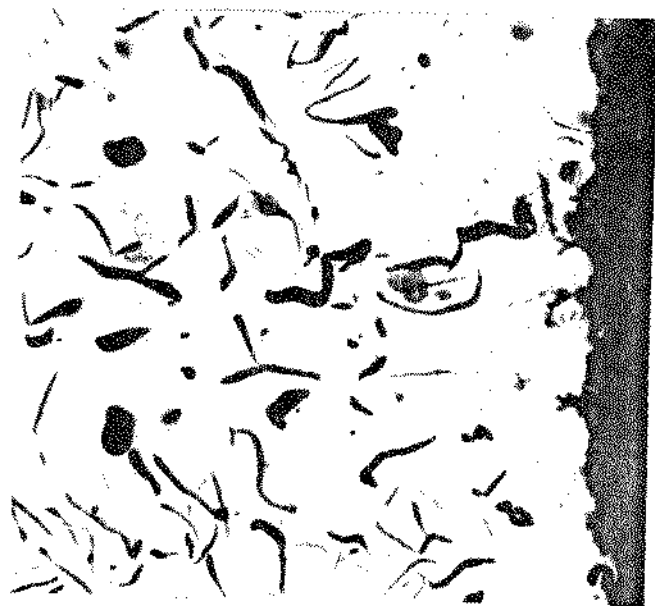


(a)

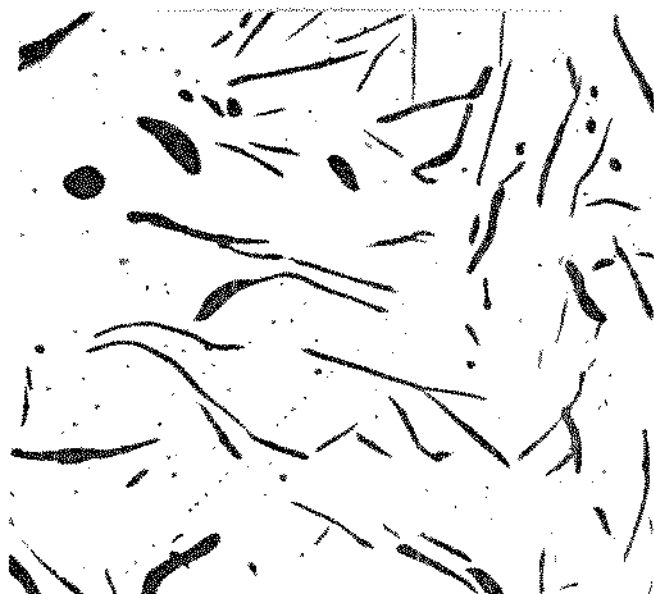


(b)

Fig. (IV.16) FE 6002 - Molde: granalha, modelo: pol. exp.
a) periferia b) interior 500X Nital 2%.



(a)



(b)

Fig. (IV.17) FC25 - Molde: quartzo, modelo: convencional.
a) periferia b) interior 100X s/ataque.



(a)



(b)

Fig.(IV.18) FC 25 - Molde: granalha, modelo: convencional.
a) periferia b) interior 100X s/ataque.



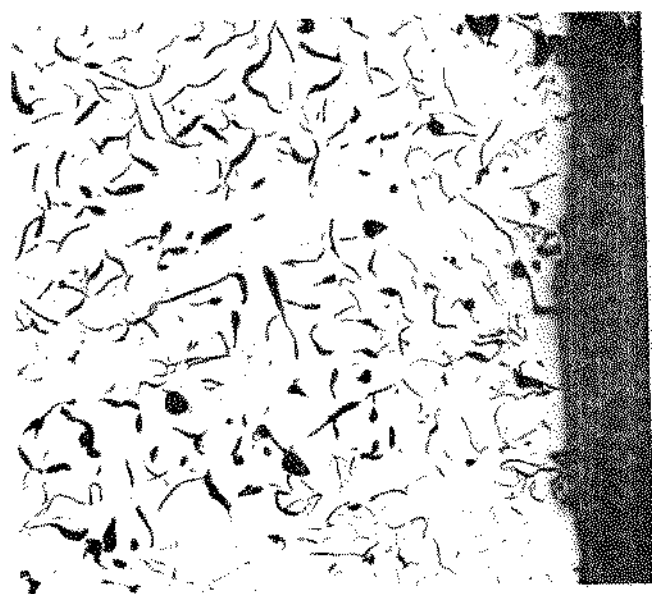
(a)



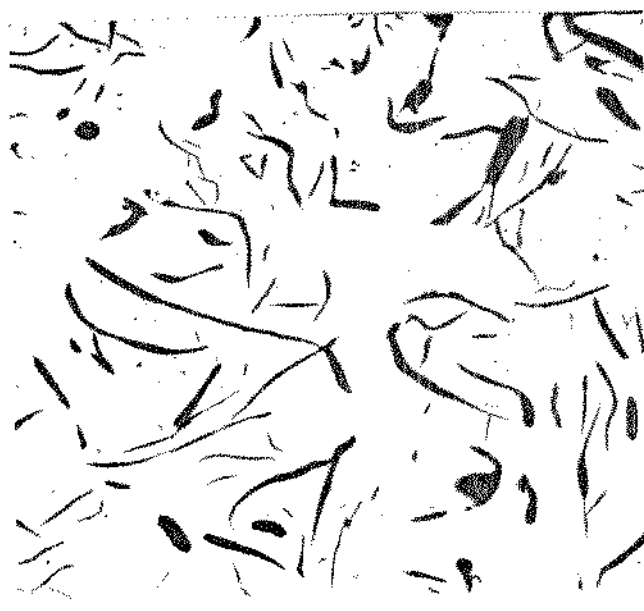
(b)

Fig. (IV.19) - FC25 - Molde: quartzo, modelo pol. exp.

a) periferia b) interior 100X s/ataque.



(a)



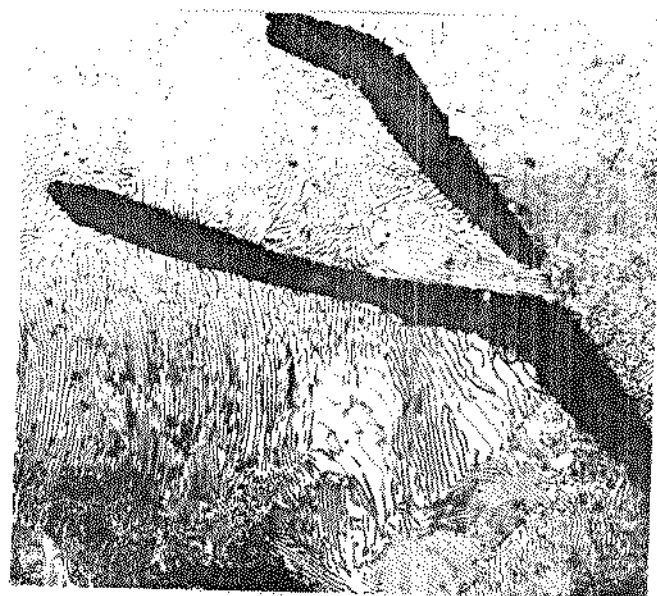
(b)

Fig.(IV.20) FC 25 - Molde: granalha, modelo: pol. exp.

a) periferia b) interior 100X, s/ataque.

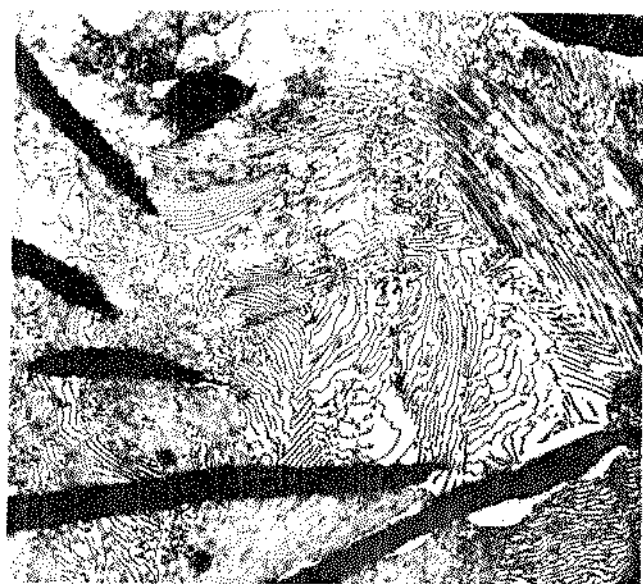


(a)



(b)

Fig.(IV.21) FC 25 - Molde: quartzo, modelo: convencional.
a) periferia b) interior 500X, nital 2%.



(a)



(b)

Fig. (IV.22) FC 25 - Molde: granalha, modelo: convencional.
a) periferia b) interior 500X, nital 2%.