

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

Tese de: Mestrado

Título da Tese: Análise da Influência da Espessura da Coqui-
Iha na Variação da Dureza de um Ferro Fundi-
do Nodular

Autor: JOSÉ DURVAL DE CAMARGO BARROS

Orientador: Prof.Dr. REZENDE GOMES DOS SANTOS

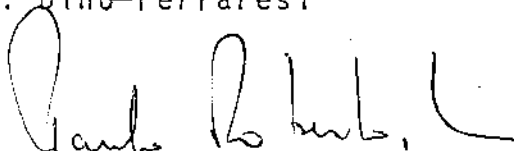
Aprovado por



Prof.Dr. Rezende Gomes dos Santos, Presidente



Prof.Dr. Dino Ferraresi



Prof.Dr. Paulo Roberto Mei

Campinas, 31 de janeiro de 1986

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

CENTRO DE TECNOLOGIA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA
DA COQUILHA NA VARIAÇÃO DA DUREZA
DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR

*Este exemplar corresponde à redação final
da tese defendida por José Durval de Camargo
Barros e aprovada pela comissão julgadora em
em 31/01/86.*

MD5

Autor: JOSÉ DURVAL DE CAMARGO BARROS

Orientador: Prof.Dr. REZENDE GOMES DOS SANTOS

Trabalho apresentado à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas - S.P. - Brasil

Janeiro de 1986

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

RESUMO

Neste trabalho foi realizado uma análise da variação de dureza ao longo de blocos de ferro fundido nodular obtidos com a utilização de coquilhas de diferentes espessuras. Para tanto, foram fundidos sete blocos, com dimensões iguais, de um ferro fundido nodular, com condições diferentes de resfriamento obtidas através do uso de coquilhas de aço com espessuras que variaram de zero (contato direto com a areia) até 100 mm.

Foram medidas, em cada bloco, as durezas ao longo dos mesmos a partir da superfície coquilhada até a uma distância relativamente grande dessa superfície.

Com os resultados obtidos foram desenvolvidas equações matemáticas que descrevem, em função da espessura de coquilha, a variação de dureza : a) ao longo de cada bloco; b) nas superfícies coquilhadas dos blocos e c) em locais bastante afastados das superfícies coquilhadas ("x" tendendo ao infinito). Finalmente, a partir das mesmas, foi desenvolvida uma equação geral que fornece a dureza em qualquer posição do bloco (peça) em função da relação espessura da coquilha utilizada/espessura do bloco.

ABSTRACT

This work presents a study on the hardness variation in chilled nodular cast iron. A number of castings were obtained by using chills with different thickness (from 0 to 100 mm).

The hardness variation of each casting was measured from the chilled surface ($x=0$) until a point far from this surface ($x \rightarrow \infty$).

Based on the analysis of the results obtained mathematical equations were developed to correlate the hardness variation in the casting with the chill thickness.

AGRADECIMENTOS

Aos colegas do Centro de Tecnologia e ao seu Superintendente Prof.Dr. DINO FERRARESI, pelo apoio na realização deste trabalho.

À "FEMAQ S.A. - Fundição - Engenharia e Máquinas", pela inestimável colaboração e pelo fornecimento dos blocos de ferro nodular coquilhados, especialmente fundidos para este trabalho.

Ao Prof.Dr. REZENDE GOMES DOS SANTOS, orientador desta tese, pelo grande estímulo e assistência dedicados durante o desenvolvimento deste trabalho.

INDICE

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA COQUILHA NA VARIAÇÃO DA DUREZA DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR

	<u>PÁGINA</u>
CAP. 1 - <u>INTRODUÇÃO</u>	
1.1 - HISTÓRICO	01
1.2 - APLICAÇÕES DOS FERROS FUNDIDOS NODULARES.....	02
1.3 - IMPORTÂNCIA DO USO DE COQUILHAS NO PROCESSO DO FERRO FUNDIDO NODULAR.....	03
1.4 - OBJETIVOS DO PRESENTE TRABALHO	04
CAP. 2 - <u>FERROS FUNDIDOS NODULARES</u>	
2.1 - CONCEITOS GERAIS	05
2.2 - ESTRUTURA METALOGRAFICA DOS FERROS FUNDIDOS NODULARES	06
2.3 - OBTENÇÃO DOS FERROS FUNDIDOS NODULARES	10
2.4 - CLASSIFICAÇÃO DOS FERROS FUNDIDOS NODULARES .	12
CAP. 3 - <u>ESTUDOS REALIZADOS SOBRE A UTILIZAÇÃO DE COQUILHAS NA FABRICAÇÃO DOS FERROS FUNDIDOS NODULARES</u>	
3.1 - OBJETIVOS DA UTILIZAÇÃO DE COQUILHAS NA PRODUÇÃO DE FERRO FUNDIDO NODULAR	17
3.2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
CAP. 4 - <u>MATERIAIS E MÉTODOS</u>	
4.1 - MATERIAL UTILIZADO	33
4.2 - FUSÃO E VAZAMENTO	33
4.3 - MOLDES UTILIZADOS	34
4.4 - ENSAIO DE DUREZA	34

CAP. 5 - <u>RESULTADOS OBTIDOS</u>	
5.1 - VARIACÃO DA DUREZA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA A PARTIR DA INTERFACE METAL/MOLDE	40
5.2 - VARIACÃO DA DUREZA EM UMA MESMA DISTÂNCIA DA SUPERFÍCIE COQUILHADA EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DA COQUILHA.....	47
CAP. 6 - <u>DESENVOLVIMENTO DE EQUAÇÕES PARA ANÁLISE DA VARIACÃO DA DUREZA EM FERROS FUNDIDOS NODULARES COQUILHADOS</u>	
6.1 - VARIACÃO DA DUREZA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DA SUPERFÍCIE COQUILHADA	49
6.2 - VARIACÃO DA DUREZA (HB_0) NA SUPERFÍCIE COQUILHADA ($x = 0$) EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DA COQUILHA	51
6.3 - VARIACÃO DA DUREZA (HB_∞) OBSERVADA EM POSIÇÕES BASTANTE AFASTADAS DA SUPERFÍCIE COQUILHADA ($x \rightarrow \infty$) EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DA COQUILHA	58
6.4 - DETERMINAÇÃO DO EXPOENTE "A" DA EQUAÇÃO QUE DESCREVE A VARIACÃO DA DUREZA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DA SUPERFÍCIE COQUILHADA	61
	,
CAP. 7 - <u>APLICAÇÃO E COMPROVAÇÃO DAS EQUAÇÕES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</u>	
7.1 - APLICAÇÃO E COMPROVAÇÃO DAS EQUAÇÕES	63
7.2 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	71
7.2.1 - Variação da Dureza (HB_0) na Superfície Coquilhada ($x=0$)	71
7.2.2 - Variação da Dureza (HB_∞) em Pontos Muito Distantes da Superfície Coquilhada ($x \rightarrow \infty$)	71
7.2.3 - Variação da Dureza ao Longo do Bloco para Diferentes Espessuras de Coquilha	72

	<u>PÁGINA</u>
7.3 - REPRESENTAÇÃO DA VARIAÇÃO DA DUREZA SIMULTANEAMENTE COM A DISTÂNCIA AO LONGO DO BLOCO (x) E COM A ESPESSURA DA COQUILHA (h) .	73
7.4 - COMENTÁRIOS FINAIS	75
CAP. 8 - <u>CONCLUSÕES</u>	78
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	80
<u>APÊNDICE</u>	
SIMBOLOGIA	85

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - HISTÓRICO

Os ferros fundidos estão entre os materiais metálicos mais antigos utilizados pelo homem, sendo que se considera no desenvolvimento da humanidade a idade do ferro de 1.200 A.C. em diante (1,2).

Os ferros fundidos utilizados a partir de 1.400 D.C. eram em geral do tipo cinzento e compostos de uma mistura de cementsita, ferro e grafita em forma de lamelas. Seu processamento até o fim do século passado era baseado em dados empíricos.

No início da década de 30, já neste século, foram observados alguns focos de grafita esferoidal dentro do ferro fundido cinzento. Provavelmente esse tipo de grafita sempre ocorreu em pequenas quantidades mas, não eram antes detectadas devido às técnicas de microscopia existentes (3,4).

Ainda na década de 30, em 1936, um ferro fundido com grafita totalmente esferoidal foi apresentado como curiosidade num congresso de fundição realizado em Dusséldorf na Alemanha (3).

De qualquer forma, a partir da década de 30, pesquisadores de muitos países começaram a se interessar pelo estudo dos ferros fundidos nodulares devido à sua boa resistência e ductilidade.

Esses pesquisadores, mais ou menos simultaneamente, concluíram que as seguintes condições eram importantes para se obter ferro fundido com grafita esferoidal:

- carbono equivalente eutético ou hipereutético
- porcentagem de enxofre menor que 0,008%

- velocidade de solidificação relativamente alta
- porcentagem relativamente alta de silício.

E na Inglaterra no final da década de 30 descobriu-se que a adição de cério no ferro fundido produzia grafita esferoidal. Mais tarde, a partir de 1942, descobriu-se nos Estados Unidos que a adição de magnésio produzia o mesmo efeito e foi desenvolvido um processo que não fazia restrições ao carbono equivalente.

A partir de 1948 já se dispunha de um processo industrialmente viável de produção de ferro fundido com grafita esferoidal (conhecido como ferro fundido nodular) e sua utilização tem aumentado desde então (3).

A partir da década de 50 pesquisas mostraram que outros elementos como cálcio, sódio, escândio, ítrio, potássio, berílio e algumas terras raras, também permitiam a obtenção da grafita esferoidal, mas, poucos deles são utilizados comercialmente.

1.2 - APLICAÇÕES DOS FERROS FUNDIDOS NODULARES

Os ferros fundidos nodulares, em termos de propriedades tecnológicas, apresentam uma série de vantagens ora em relação aos aços, ora em relação aos ferros fundidos cinzentos e maleáveis, substituindo em função disso em muitas aplicações esses materiais. Essas substituições vêm inclusive aumentando consideravelmente a partir de 1960, já que o ferro fundido nodular combina as vantagens dos aços com a economia de processamento característica dos ferros fundidos (5-7).

Entre as propriedades tecnológicas mais importantes dos ferros fundidos nodulares podem ser citados as seguintes:

- usinabilidade, devido à grafita que apresenta propriedades lubrificantes e facilita a quebra do cavaco.
- acabamento superficial de usinagem.

- precisão dimensional, devido à baixa deformação permanente.
- capacidade de amortecimento de vibrações
- fluidez, que facilita a obtenção de peças fundidas com paredes finas.
- resistência à corrosão, à fadiga, à compressão, etc.

Em função das vantagens citadas, os ferros fundidos nodulares são usados na fabricação de inúmeras peças entre as quais podem ser citadas:

- tubos para água, óleo e gás
- cilindros laminadores
- lingoteiras
- girabrequins para motores de pequenos a grandes portes
- engrenagens
- peças de freios
- blocos de motores
- peças para indústria naval
- matrizes para estampagem de chapa
- bases e corpos de máquinas.

1.3 - IMPORTÂNCIA DO USO DE COQUILHAS NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO DO FERRO NODULAR

O termo coquilha é utilizado tanto para designar moldes metálicos permanentes como peças metálicas inseridas em determinados locais nos moldes de areia com funções específicas.

Os moldes metálicos em particular apresentam as seguintes vantagens: alta precisão dimensional, alta produtividade e melhoria das propriedades mecânicas em função da maior velocidade de extração de calor. No entanto, sua aplicação é restri-

ta a peças de formas não muito complicadas e de peso relativamente baixo(8).

Na fabricação de peças de ferro fundido nodular utilizam-se em geral, moldes de areia. Mesmo assim, algumas peças específicas de menor dimensão são produzidas via molde permanente. Entre essas, podem ser citadas as seguintes: roldanas, virabrequins, componentes de freios, tubos centrifugados, etc (9, 10).

Já as coquilhas inseridas em moldes de areia são bastante empregadas na fabricação de peças de ferro fundido nodular. As razões para esse emprego são basicamente as seguintes:

- a) Aumentar a dureza em locais específicos. Como exemplo desta aplicação podemos citar: superfícies dos ressaltos dos eixos comando de válvulas, flancos dos dentes de engrenagens, superfícies de rolamento de rodas de trem e cilindros laminadores, etc (6, 11).
- b) Aumentar a baixa velocidade de solidificação em peças espessas a qual provoca efeitos indesejáveis na microestrutura dos ferros fundidos nodulares.

1.4 - OBJETIVOS DO PRESENTE TRABALHO

Tendo em vista a aplicação crescente dos ferros fundidos nodulares e a importância do uso de coquilhas na fundição dos mesmos, o objetivo principal deste trabalho é o estudo da correlação entre propriedades mecânicas e a espessura da coquilha utilizada. Para tanto, foram fundidos blocos de ferro nodular utilizando coquilhas com diferentes espessuras. Foi medida a variação da dureza no bloco em função da posição a partir da superfície coquilhada, para cada um dos casos. A partir dos resultados experimentais obtidos, foram desenvolvidas equações para correlacionar a dureza com a espessura da coquilha e posição no bloco.

CAPÍTULO 2

FERROS FUNDIDOS NODULARES

2.1 - CONCEITOS GERAIS

Os ferros fundidos nodulares podem ser definidos como liga contendo basicamente ferro, carbono e silício com composições próximas da composição eutética, nos quais a grafita (carbono não combinado) apresenta-se na forma de nódulos aproximadamente esféricos devido a adição de certos elementos químicos durante o processo de fabricação.

Nas ligas ferro-carbono, a composição eutética é aquela que apresenta 4,3% de carbono. No entanto, nos ferros fundidos como existem outros componentes além do ferro e do carbono, costuma-se definir a composição através de uma porcentagem de carbono equivalente (CE). No caso deste componente adicional ser apenas o silício, o carbono equivalente é definido como (3):

$$CE = \% C + 0,31 (\% Si)$$

e considera-se como composição eutética, uma porcentagem de carbono equivalente igual a 4,3. Assim, se um ferro fundido possui carbono equivalente igual a 4,3% diz-se que ele é um ferro fundido eutético, se possui carbono equivalente maior que 4,3% diz-se que ele é um ferro fundido hipereutético e se possui o carbono equivalente menor que 4,3% diz-se que ele é um ferro fundido hipoeutético.

Os ferros fundidos podem ter elementos de liga em suas composições com a finalidade de ter suas propriedades mecânicas mais elevadas, ou melhoradas as resistências às altas temperaturas, à oxidação, etc.

Os elementos de liga agem de duas formas:

- como grafitizantes pela decomposição da cementita, como é o caso do silício, do alumínio, do níquel, do cobre e do titânio, (adicionado em baixo teor).
- como promovedores da formação de carbonetos (retardando a formação da grafita) como é o caso do manganês, do cromo, do molibdênio, do vanádio, do tungstênio e do titânio (adicionado em teor elevado).

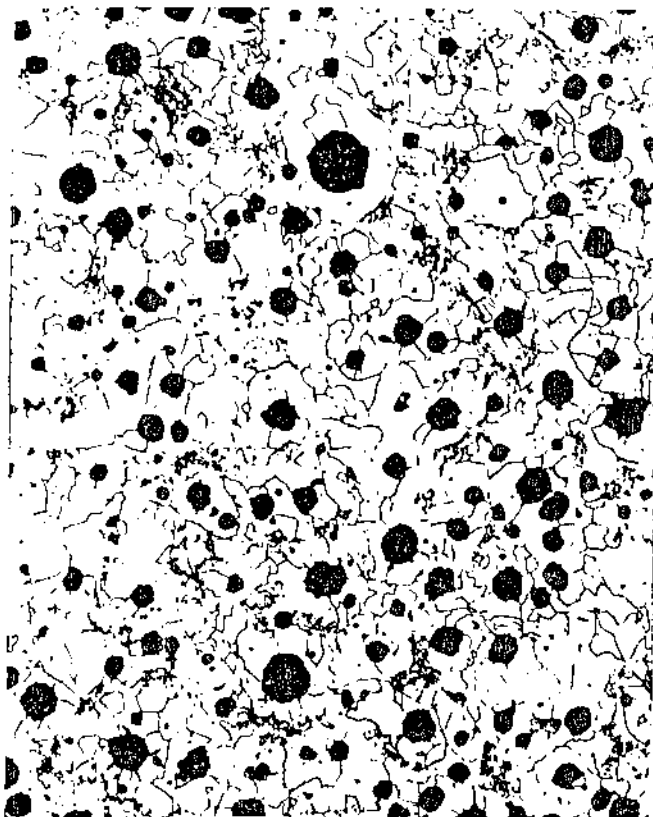
Quase todos os elementos de liga tendem a aumentar a resistência à tração e a dureza, sendo os mais eficientes neste sentido, o vanádio, o molibdênio e o cromo (12-14).

2.2 - ESTRUTURA METALOGRAFICA DOS FERROS FUNDIDOS NODULARES

A característica principal da estrutura dos ferros fundidos nodulares é a grafita livre na forma de nódulos esféricos (ver Fig.2.1) em matrizes metálicas.

As matrizes observadas nos ferros fundidos nodulares podem ser constituídas dos seguintes componentes:

- Ferrita: solução sólida de ferro com estrutura CCC contendo baixíssima porcentagem de carbono. A matriz ferrítica é dúctil, apresenta baixa resistência mecânica, baixa resistência à abrasão, boa resistência ao impacto e boa usinabilidade.
- Perlita: mistura de ferrita e cementita. Apresenta ductilidade moderada, é relativamente dura, tem boa resistência mecânica, boa resistência à abrasão, resistência ao impacto moderada e boa usinabilidade.
- Bainita: estrutura formada por cementita em forma de agulhas e ferrita altamente deformada (com carbono retido). Obtida através de tratamentos térmicos e/ou elementos de liga. Apresenta dureza e resistência mecânica maior que a perlita, resistência ao impacto e usinabilidade moderadas.



Nital 2%

100 x

Figura 2.1 - Nódulos de grafita, em uma matriz predominantemente ferrítica com pequenas quantidades de perlita, de um ferro fundido nodular.

- Martensita: fase altamente distorcida que surge quando a estrutura CFC característica da austenita se transforma em CCC retendo todo o carbono em solução. Obtida em geral em ferros fundidos nodulares ligados, com resfriamento rápido. É um componente muito duro e frágil com alta resistência à abrasão.
- Austenita: solução sólida de carbono em ferro com estrutura CFC. Apresenta resistência mecânica relativamente baixa, alta ductilidade, alta resistência ao impacto, boa resistência à corrosão e é fácil de usar. Para se obter uma matriz austenítica é necessário adicionar elementos de liga como o níquel em porcentagens relativamente altas.
- Cementita: reticulado cristalino ortorrômbico contendo doze átomos de ferro e quatro átomos de carbono. Apresenta alta dureza, baixa ductilidade, boa resistência à abrasão e baixa usinabilidade.

Os ferros fundidos nodulares são utilizados normalmente no estado bruto de fusão, por razões econômicas. Através de uma seleção de composição química, consegue-se obter a maioria dos tipos de ferros fundidos nodulares no estado bruto de fusão. No entanto, os ferros fundidos nodulares podem também ser tratados termicamente com a finalidade de se atingir os seguintes objetivos (13, 15):

- alívio de tensões provocadas pela solidificação
- obtenção de maior ductilidade e melhor usinabilidade
- melhoria das propriedades mecânicas de resistência
- decomposição de carbonetos
- endurecimento.

Os seguintes tratamentos térmicos podem ser aplicados aos ferros fundidos nodulares:

- a) Recozimento: quando se deseja, além de aliviar tensões, aumentar a ductilidade, a usinabilidade e a re-

sistência ao impacto, porém, com diminuição da resistência mecânica. A cementita é transformada em ferrita + grafita, desta forma a matriz vai se tornando ferrítica. Este tratamento é utilizado também para decompôr a cementita nas regiões coquilhadas.

- b) Alívio de tensões: para minimizar as tensões originadas no material durante a solidificação. Como as temperaturas para este tratamento são inferiores às aquelas do recozimento, os efeitos sobre a microestrutura e propriedades mecânicas também são menores.
- c) Normalização: para aumentar as propriedades mecânicas de resistência ou restaurar as propriedades do estado bruto de fusão perdidas devido a tratamentos térmicos anteriores.
A normalização produz normalmente uma matriz constituída de perlita fina, porém em peças de pequenas seções pode se tornar martensítica.
- d) Têmpera e revenimento: para aumentar sensivelmente a dureza, porém conservando ainda alguma resistência ao impacto. O revenimento posterior se torna necessário para aliviar as tensões produzidas na peça devido a esse tratamento. O meio mais utilizado na têmpera é o óleo, por não produzir tensões muito fortes. Em peças de geometria mais simples pode-se utilizar a água como meio refrigerante. A têmpera produz matriz martensítica no ferro fundido.
Os ferros fundidos coquilhados não devem ser temperados, pois quantidades significativas de cementita livre provocam fissuramento durante a têmpera.
- e) Endurecimento superficial: para se obter peças com camada externa com dureza elevada e núcleo relativamente dúctil. O ferro fundido nodular pode ser endurecido superficialmente tanto por chama como por indução. Após o tratamento obtêm-se na periferia das peças ma-

trizes martensíticas. Deve-se então fazer um tratamento de alívio de tensões.

- f) Austêmpera e martêmpera: estes dois tratamentos têm por base os diagramas de transformação isotérmica. Na austêmpera se obtém matriz bainítica que confere ao ferro fundido nodular uma dureza elevada, com razoável resistência ao impacto. Na martêmpera se obtém matriz martensítica e portanto, com elevada dureza, e ainda com um mínimo de distorção na peça.

2.3 - OBTENÇÃO DOS FERROS FUNDIDOS NODULARES

Para se obter o ferro fundido nodular são necessárias as seguintes condições (3, 6, 13, 16):

a) Escolha das matérias primas

Na produção de ferro fundido nodular, a composição química base deve ser ajustada ao tipo de ferro que se deseja obter e à velocidade de resfriamento, que depende das espessuras das paredes das peças.

As matérias primas têm que ser bem controladas, porque pequenos teores de impurezas, como por exemplo, telúrio, chumbo, antimônio, bismuto, selênio e titânio, dificultam ou até impedem a obtenção de grafita em nodulos (17).

Na prática, usa-se geralmente ferro gusa e sucata. A sucata deve ser ferro fundido nodular usado em forma de retorno de fundição. As proporções destes dois ingredientes, determinarão a quantidade adicional de outro tipo de sucata, por exemplo, o aço doce, que possui baixos teores de carbono e silício, fazendo com que reduza os teores destes dois elementos no ferro fundido.

São usados também, quando necessários, compostos de ferro e silício, de ferro e manganês, briquetes (pastilhas) de silício, ferro especular, gusa argêntea e outros componentes com composições químicas conhecidas.

b) Fusão

A fusão das matérias primas pode ser feita nos seguintes tipos de fornos:

Cubilô (com aquecimento por coque, gás ou óleo)

Forno rotativo (aquecido a óleo)

Forno de indução.

c) Tratamento do banho metálico

Em geral é feita uma dessulfuração para abaixar o teor de enxofre e um superaquecimento do banho para destruir núcleos de solidificação instáveis visando minimizar as influências do emprego de matérias primas diferentes.

d) Nodulização

Consiste na adição ao banho metálico de determinados elementos químicos, com a finalidade de se promover a formação de nódulos de grafita,

Os principais elementos nodulizantes são o magnésio e o cério. Mas, além desses, outros elementos podem ser usados, tais como: cálcio, lítio, bismuto, sódio, potássio, selênio, bário, estrôncio, zinco, escândio, samário, neodímio, lantânio, alumínio, silício, ítrio e telúrio. No entanto, alguns destes elementos não são aplicáveis em condições industriais.

Comercialmente os elementos mais utilizados são: magnésio, cério e cálcio. Sendo que o mais usado é o magnésio, tanto na forma pura como em ligas nodulizantes.

c) Inoculação

A inoculação de ferros fundidos, consiste na adição ao banho metálico, momentos antes do vazamento, de compostos grafitizantes, geralmente ricos em silício (18).

Este tratamento tem por objetivo promover a formação de grafita na solidificação dos ferros fundidos, minimizando a tendência ao coquilhamento.

Entre os inoculantes disponíveis, o mais aplicado é o composto de ferro e silício contendo teores residuais de cálcio e alumínio. Além deste, podem ser usados outros inoculantes contendo bário, estrôncio, cério, magnésio, etc.

A inoculação é sempre feita após a nodulização ter-se iniciado.

2.4 - CLASSIFICAÇÃO DOS FERROS FUNDIDOS NODULARES

Os ferros fundidos nodulares são em geral classificados de acordo com suas propriedades mecânicas à tração, medidas em corpos de prova padronizados.

A norma brasileira NBR 6916/1981 designa pelas letras FE o ferro fundido nodular ou ferro fundido com grafita esferoidal (19). Seguem a essas letras cinco algarismos, os três primeiros indicam o valor mínimo do limite de resistência à tração, em MPa e os dois últimos algarismos indicam o valor mínimo do alongamento porcentual. Quando, após as letras e algarismos já citados vierem as letras RI, significa que esta classe de ferro fundido nodular exige requisitos de impacto (ver Tabela 2.1).

Há normas que além das propriedades mecânicas já citadas, exigem também análise química.

No exame metalográfico de uma amostra de ferro fundido nodular, devem ser citados além dos componentes da matriz, even

TABELA 2.1 - Propriedades mecânicas do ferro fundido nodular

Classe	Limite de resistência à tração mínimo - LR (MPa)	Limite de escoamento (0,2%) mínimo - LE (MPa)	Alongamento em 5d mínimo - A (%)	Somente a título Informativo	
				Faixa aproximada da dureza Brinell	Estrutura metalográfica predominante
FE 38017	380	240	17,0	140 - 180	ferrítica
FE 42012	420	280	12,0	150 - 200	ferrítica
FE 50007	500	350	7,0	170 - 240	ferrítica e perlítica
FE 60003	600	400	3,0	210 - 280	perlítica
FE 70002	700	450	2,0	230 - 300	perlítica
FE 80002	800	550	2,0	240 - 312	perlítica
FE 38017-RI*	380	240	17,0	140 - 180	ferrítica

* Classe com requisitos de impacto.

tuais inclusões, microporosidades e a porcentagem de grafita que não apresenta formato esferoidal. O tamanho dos nódulos e o número de nódulos por milímetro quadrado são dados importantes e também devem ser citados.

A norma brasileira NBR 6593/1981 que trata da morfologia da grafita em ferros fundidos, define os tamanhos da grafita, que vão de 1 (os maiores) até 8 (os menores) (20).

A norma brasileira NBR 6913/1981 define as condições para se fazer a contagem do número de nódulos por milímetro quadrado, através de microscópio ótico metalográfico (21).

A contagem do número de nódulos por milímetro quadrado pode ser feita também por comparação direta da imagem da amostra projetada numa tela de microscópio, com cem vezes de aumento, com cartas padronizadas que vão de 25 a 300 nódulos por milímetro quadrado. A Figura 2.2 ilustra as duas cartas com valores extremos.

A nível internacional existe a norma ISO (International Organization for Standardization) com a sigla R 1083, que trata dos ferros fundidos nodulares. Além dessa, cada país possui a sua própria norma, e a título de ilustração são apresentadas na Tabela 2.2 algumas delas (6, 11).

TABELA 2.2 - NORMAS PARA FERRO FUNDIDO NODULAR

<u>PAÍS</u>	<u>NORMA</u>
África do Sul	SABS 936
Alemanha Ocidental	DIN 1693
Alemanha Oriental	TGL 8189
Áustria	Ö NORM M 3193
Bélgica	NBN 830-02
Brasil	NBR 6916
Estados Unidos	ASTM A 439 A 476 A 536 A 571 SAE AMS 5315 5316

	SAE AMS 5394
	5395
	J 434
	MIL 11466 A
	I-22243
	I-24137
	AGMA 211.02
	244.02
	ASME SA 397
	API 604
Finlândia	SFS 2113
França	NF A 32-201
	AFFGS
Holanda	NEN 6002-D
Índia	IS 1865
Inglaterra	BS 2789
	3468
Itália	UNI 4544
Japão	JIS G 5502
Noruega	NS 11301
Polônia	PN-62-H-83123
Romênia	STAS 6071
Suécia	SIS 1407
Tchecoslováquia	CSN 42-1242
Turquia	TS 526
União Soviética	GOST 7293

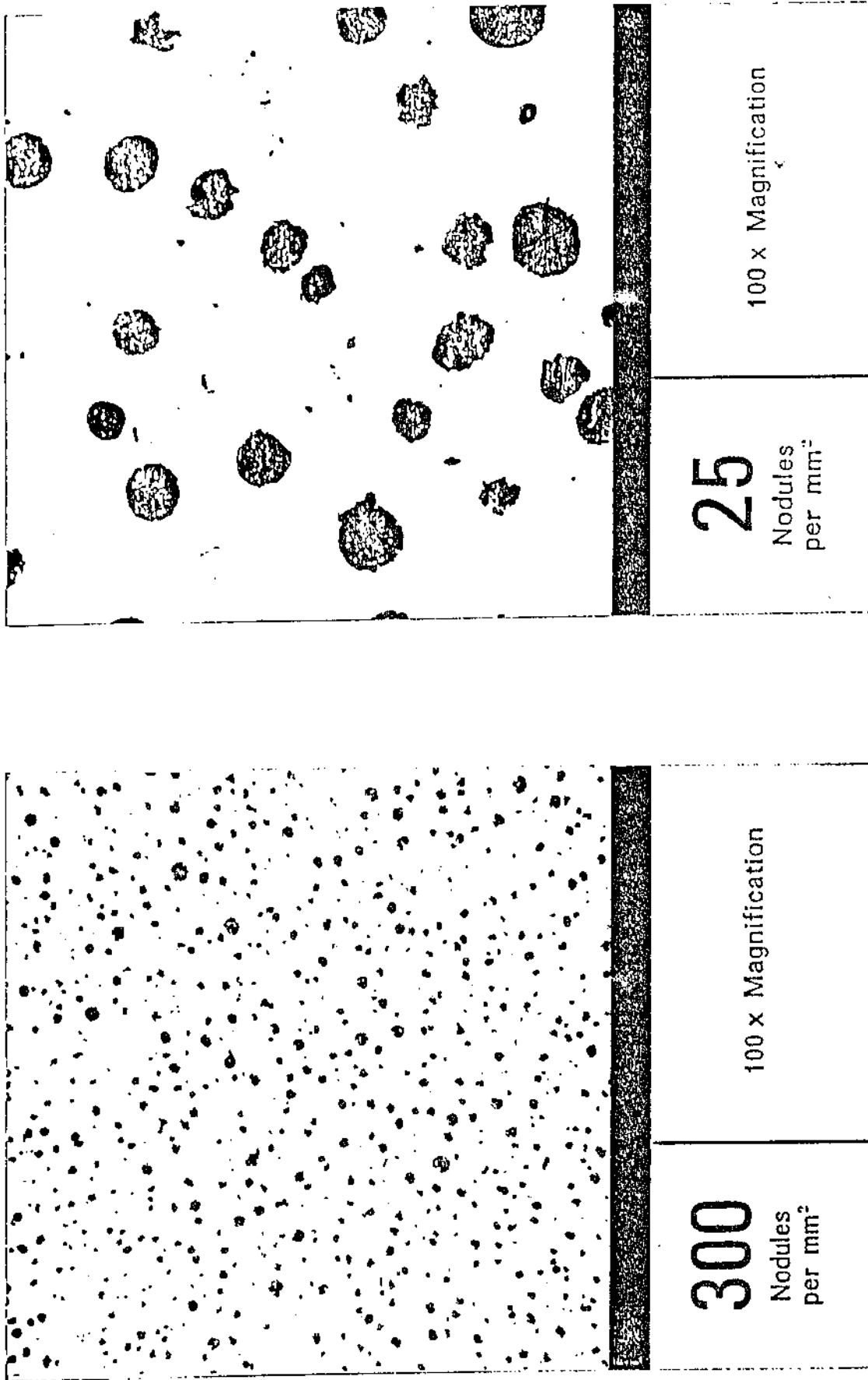


Fig. 2.2 - Exemplos de cartas padronizadas, para a determinação do número de nódulos por milímetro quadrado, em ferros fundidos nodulares

CAPÍTULO 3

ESTUDOS REALIZADOS SOBRE A UTILIZAÇÃO DE COQUILHAS NA FABRICAÇÃO DOS FERROS FUNDIDOS NODULARES

3.1 - OBJETIVOS DA UTILIZAÇÃO DE COQUILHAS NA PRODUÇÃO DE PEÇAS DE FERRO FUNDIDO NODULAR

Neste capítulo serão analisadas as implicações da utilização de coquilhas inseridas em moldes de areia com o objetivo de aumentar a extração de calor em pontos localizados da peça.

Como já foi citado no capítulo 1, os principais objetivos da utilização dessas coquilhas, são:

- aumentar a dureza em locais específicos
- aumentar a velocidade de solidificação, que é baixa em peças espessas.

O aumento da dureza está diretamente associada à modificação da microestrutura provocada pela velocidade de resfriamento mais rápida.

Já o aumento da velocidade de solidificação em peças espessas, tem a finalidade de evitar problemas típicos de baixa velocidade de solidificação, tais como:

- degeneração da grafita
- baixo número de nódulos de grafita e conseqüente tamanho grande
- flutuação da grafita
- coquilhamento inverso
- segregação
- alterações indesejáveis na matriz.

Esses problemas serão abordados com mais detalhes a seguir.

De qualquer forma, o principal objetivo deste trabalho, é o estudo do coquilhamento, visando obter alta dureza superficial em peças de ferro fundido nodular que devam apresentar alta resistência ao desgaste.

3.2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Não foram encontrados na literatura muitos trabalhos que abordam especificamente o estudo do coquilhamento. No entanto, existem alguns trabalhos relacionados com a velocidade de resfriamento, que tratam direta ou indiretamente o assunto. A seguir, serão comentados alguns deles.

Loper e outros, publicaram entre 1967 e 1968 alguns estudos sobre a utilização de coquilhas (22-24). Em 1969 Withey e Loper publicaram um trabalho abordando diretamente o efeito do uso de coquilhas em peças de ferro fundido nodular com seção espessa (25). Os autores, solidificaram unidirecionalmente, corpos de prova de ferro fundido nodular com altura de 10 polegadas, usando coquilhas de aço com diferentes espessuras (1 a 5 polegadas) e analisaram a influência dessas espessuras de coquilha nas condições térmicas e nas microestruturas. O objetivo desse trabalho foi o estudo de alguns problemas relacionados com a baixa velocidade de solidificação em peças de seção espessa que pode ocasionar por exemplo a formação de grafita vermicular, baixo número de nódulos e formação de carbeto devido à segregação de solutos.

Os autores, a partir de estudos e trabalhos experimentais realizados, chegaram a uma série de conclusões que serão resumidas a seguir:

- o controle do carbono equivalente em peças de seção espessa é importante para evitar a flotação da grafita e a formação de grafita não esferoidal, sendo recomendada a

faixa entre 4,35% e 4,65%.

- o aumento da espessura da coquilha faz diminuir o tempo de solidificação. No entanto, a medida que a temperatura da coquilha aumenta, levando-a a uma saturação de calor, sua influência no resfriamento da peça diminui.
- existem dois tipos de grafita vermicular encontrados nos ferros fundidos nodulares. O primeiro tipo, com distribuição altamente aleatória, é encontrado a distâncias maiores que 2 a 5 polegadas da coquilha, pois sua formação varia suavemente com a espessura da coquilha utilizada, ou aleatoriamente através de todo o fundido quando se usa molde de areia (sem coquilha). Esse tipo de grafita vermicular aleatória aparece quando o número de nódulos por milímetro quadrado é insuficiente (abaixo de 60 a 70 nódulos por milímetro quadrado) e além disso, quando a quantidade de magnésio presente é baixa, diminui a estabilidade do envelope de austenita que envolve a grafita aumentando ainda mais a quantidade de grafita vermicular. Esse tipo de grafita vermicular ocorre mesmo quando o resfriamento permanece positivo. O segundo tipo de grafita vermicular apresenta-se agrupado e por isso mesmo, afeta severamente as propriedades mecânicas do ferro fundido nodular. Esse tipo aparece quando a curva de resfriamento apresenta um patamar devido à reação eutética, ou quando ocorre uma recalescência, ou seja, quando o resfriamento não se mantém sempre positivo, destruindo muitos núcleos de grafita. Esse acúmulo de calor durante a reação eutética associado a uma redução da extração de calor pela coquilha, pode causar decomposição do envelope de austenita deixando a grafita esferoidal novamente em contato com o líquido. Esse nódulo se decompõe crescendo novamente sob a forma de grafita vermicular agrupada. Na Figura 3.1a são mostradas curvas de resfriamento de um ferro fundido nodular comercial solidificado em molde de areia

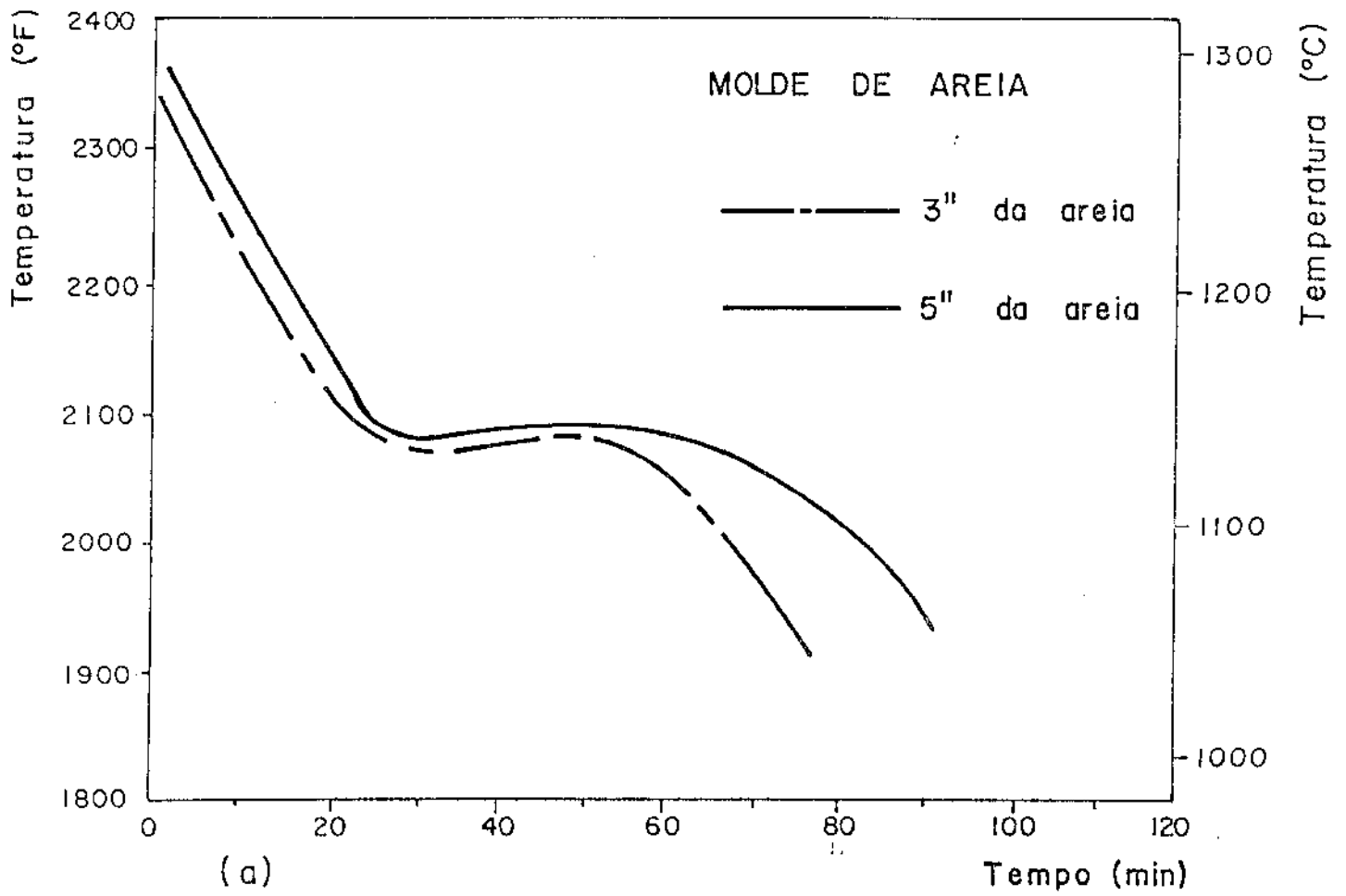


Figura 3.1.a - Curvas de resfriamento de um ferro fundido nodular comercial solidificado em molde de areia (25).
(Foram mantidas às unidades usadas pelo autor)

(sem uso da coquilha) onde pode-se notar que tanto às distâncias de 3 e de 5 polegadas do molde são observados os patamares. Já na Figura 3.1.b, usando coquilha de 1 polegada de espessura, à distância de 3 polegadas da coquilha, a curva mantém um resfriamento sempre positivo, mas às distâncias de 4 e de 5 polegadas, as curvas já apresentam patamares. Já com coquilha de 4 polegadas de espessura, ver Figura 3.1.c, à distância de 5 polegadas da coquilha, a curva mantém um resfriamento sempre positivo enquanto que a 6 e 7 polegadas de distância da coquilha, as curvas já apresentam patamares. A distância máxima da coquilha, que se conseguiu curva de resfriamento sempre positivo, foi de 5 polegadas e a análise micrográfica revelou que até essa distância foi possível evitar a grafita vermicular agrupada.

- o número de nódulos por milímetro quadrado aumenta com o aumento da espessura da coquilha, a uma dada distância da mesma, até aproximadamente 6 polegadas. A partir daí, parece que o número de nódulos por milímetro quadrado, independe da espessura da coquilha devido à formação da grafita vermicular. Por outro lado, o número de nódulos por milímetro quadrado contados nas superfícies dos ferros fundidos adjacentes às coquilhas, independem das espessuras das mesmas. O efeito das coquilhas no número de nódulos por milímetro quadrado diminui bruscamente a partir de uma polegada de distância das coquilhas. Estas constatações podem ser verificadas na Figura 3.2.
- o tempo de permanência do ferro fundido nodular na panela de fundição, provoca redução do número de nódulos por milímetro quadrado. Esta observação foi feita também por outro autor (26) o qual afirma que isto ocorre devido ao abaixamento do teor de magnésio, do qual depende a formação da grafita esferoidal.

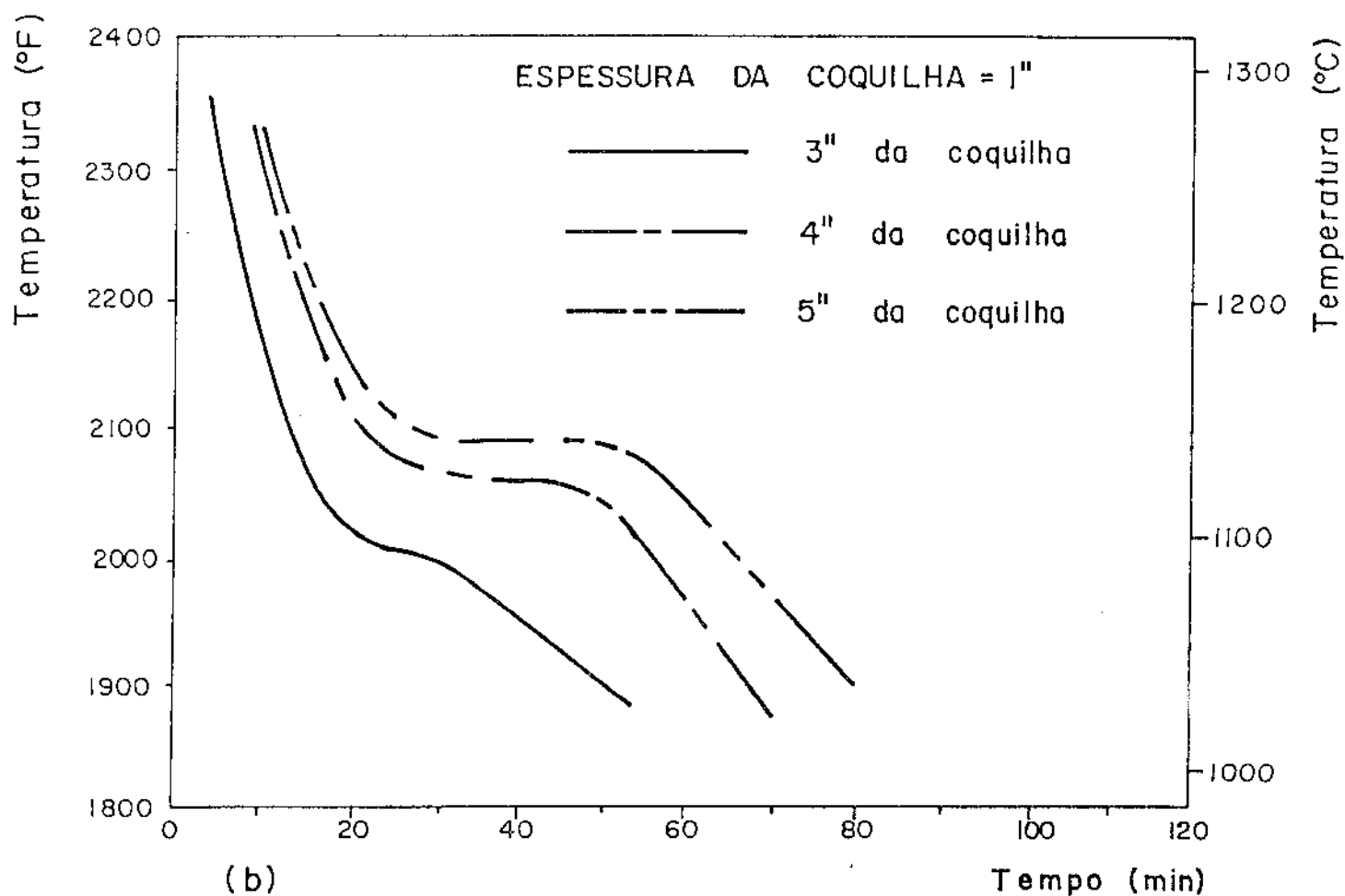


Figura 3.1.b - Curvas de resfriamento de um ferro fundido nodular comercial solidificado com o auxílio de uma coquilha de uma polegada de espessura (25).
(Foram mantidas as unidades usadas pelo autor)

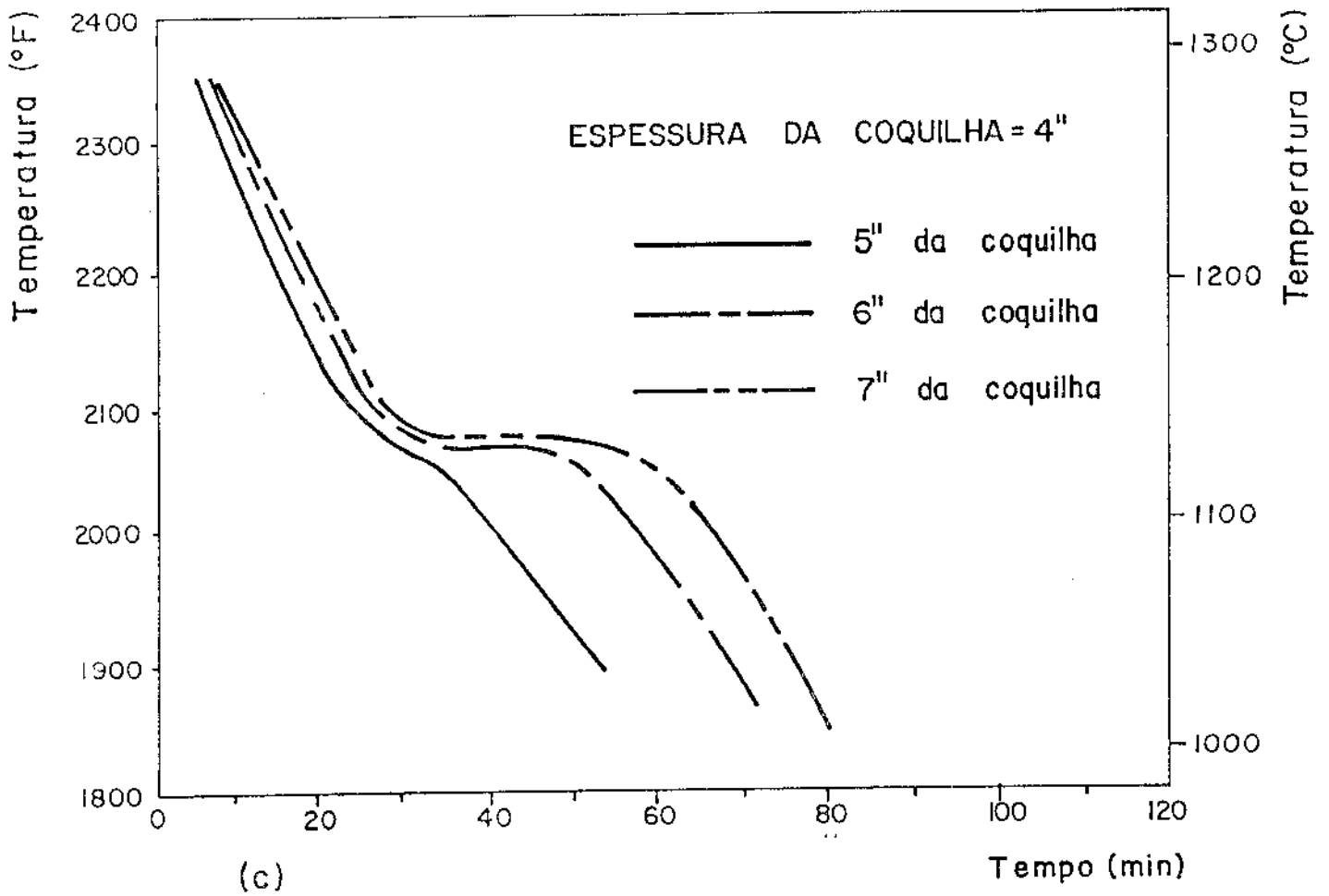


Figura 3.1.c - Curvas de resfriamento de um ferro fundido nodular comercial solidificado com o auxílio de uma coquilha de quatro polegadas de espessura (25). (Foram mantidas as unidades usadas pelo autor)

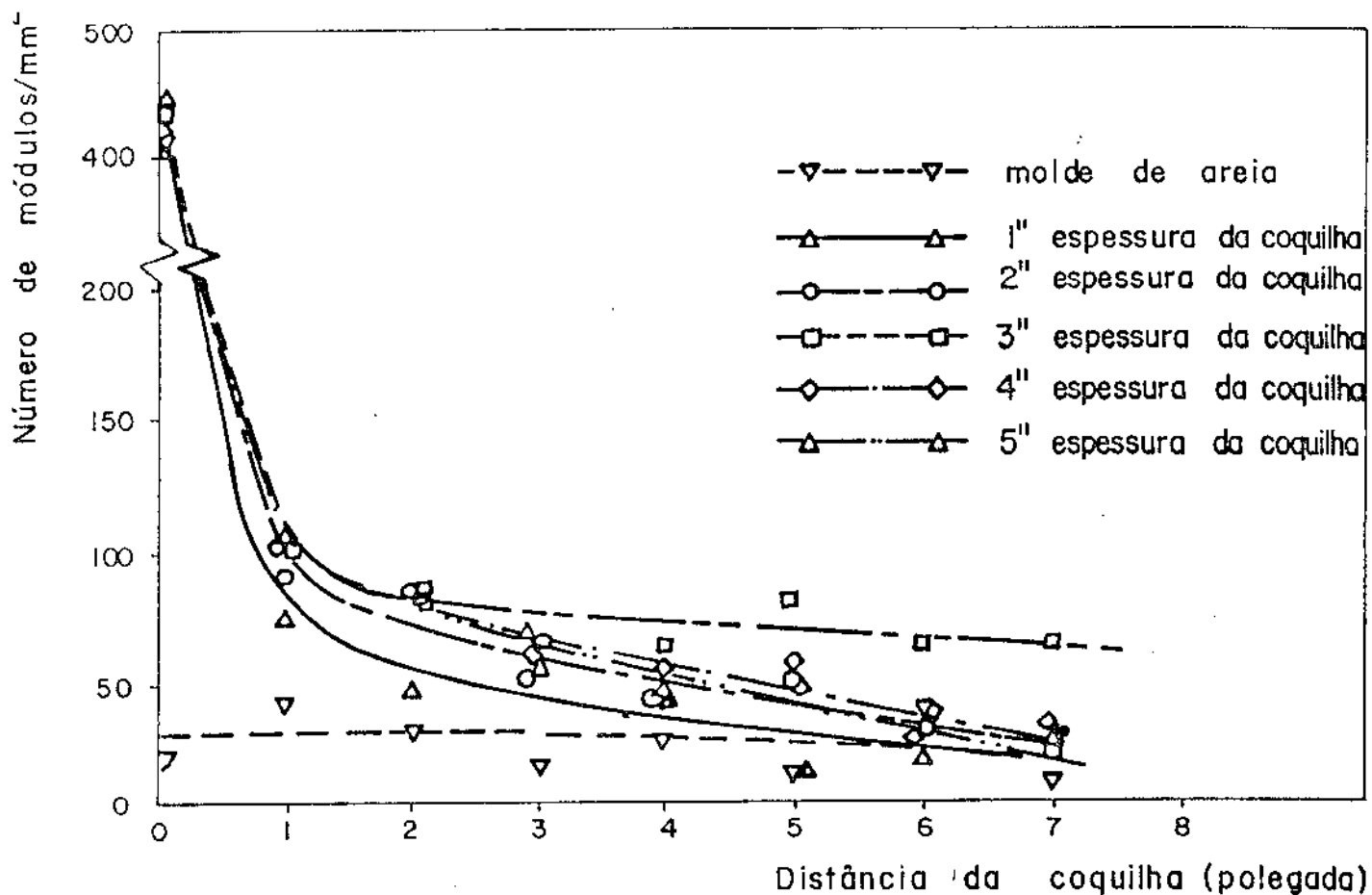


Figura 3.2 - Curvas que indicam o número de nódulos por milímetro quadrado em função da distância da coquilha e da espessura da mesma, para um ferro fundido nodular comercial (25)
(Foram mantidas as unidades usadas pelo autor)

- a perfeição da forma esferoidal da grafita, aumenta em um dado ponto do fundido, com o aumento da espessura da coquilha e diminui para uma mesma coquilha, com o aumento da distância da mesma.
- o uso de coquilhas pode causar um aumento de carbônetos primários nas regiões dos fundidos adjacentes às coquilhas.

Souza Santos e Albertin, publicaram em 1977, um trabalho onde tratam do estudo das microestruturas e propriedades mecânicas de ferros fundidos nodulares hipoeutéticos, eutéticos e hipereutéticos, resfriados com baixas velocidades (27).

Foram fundidas peças com seções espessas em moldes de areia, para obter baixas velocidades de resfriamento. Os resultados de ensaios metalográficos e de ensaios de tração realizados nessas peças foram comparados com os resultados obtidos desses mesmos ensaios realizados em blocos Y padronizados. Através dos resultados obtidos, os autores analisaram a influência das baixas velocidades de resfriamento na formação de alguns dos defeitos já citados, principalmente a degeneração da grafita e suas conseqüentes alterações nas propriedades mecânicas, e sugerem que a utilização de coquilhas poderia minimizar estes problemas.

Ainda em 1977, Albertin e outros estudaram a flutuação da grafita em peças de seções espessas de ferros fundidos nodulares com ligas hipoeutéticas, eutéticas e hipereutéticas (28).

Verificou-se nesse trabalho que nas ligas hipoeutéticas e eutéticas não ocorreu a flutuação da grafita, embora isso pudesse ter ocorrido. As ligas hipereutéticas apresentaram flutuação da grafita. Nesse trabalho os autores sugerem o uso de coquilhas em peças espessas de ferro fundido nodular, para evitar a flutuação da grafita, baseados nos seguintes argumentos:

- o aumento da velocidade de resfriamento diminui o tempo que transcorre entre a formação do nódulo e seu envolvimento pela austenita, que sendo mais densa, dimi-

nui a possibilidade de flutuação.

- o aumento do número de nódulos, provoca uma diminuição do volume médio dos mesmos e conseqüentemente dificulta a flutuação.

Aproximadamente na mesma época (1976/1977), Santos e Müller publicaram trabalhos enfocando diretamente a utilização de coquilha na solidificação de ferro fundido nodular (29,30).

Foram obtidos lingotes cilíndricos de ferro fundido nodular, com diâmetros de 30 mm e comprimentos de 140 mm, utilizando-se coquilhas de ferro fundido com o mesmo diâmetro dos lingotes e espessura constante e igual a 30 mm. Foram vazados simultaneamente quatro lingotes, sendo um com a coquilha em contato direto com o metal, outros dois com espessuras de areia iguais a 10 e 30 mm entre o metal e a coquilha e o último, utilizando apenas areia (sem coquilha).

Foram analisados nos diversos lingotes as variações da dureza Brinell, do número de nódulos por milímetro quadrado e do tamanho médio dos nódulos em função da distância longitudinal a partir da extremidade coquilhada. Foi analisada também, a qualidade da forma da grafita e a estrutura da matriz. Foi ainda analisada a extração de calor tanto pela parede coquilhada, como pela superfície cilíndrica lateral do lingote.

As conclusões apresentadas pelos autores foram as seguintes:

- a introdução de areia entre as coquilhas e os lingotes praticamente anula o efeito das coquilhas.
- a densidade de nódulos é tanto maior quanto maior a extração de calor pelo molde, portanto, o uso de coquilha aumenta o número de nódulos por milímetro quadrado.
- quanto maior a extração de calor, menor e mais perfeito o nódulo de grafita, para uma mesma distância da interface metal molde.

- quanto maior a extração de calor, maior a ocorrência de carbonetos. Portanto, a utilização de coquilhas aumenta a quantidade de carbonetos presentes.
- a dureza aumenta com a extração de calor, ou seja, peças coquilhadas apresentam em uma mesma distância da interface metal molde, durezas maiores que de peças fundidas em moldes de areia.

Um problema com esse trabalho é que já foi escolhido para o lingote a ser estudado um formato cilíndrico com diâmetro relativamente pequeno. Como a coquilha tinha pequena espessura em relação ao comprimento do lingote e foi colocada em uma das extremidades de modo a extrair calor através da seção transversal, houve uma forte influência da extração de calor radial (que é bastante eficiente) pela areia, dificultando a análise isolada dos efeitos da coquilha na estrutura e nas propriedades mecânicas.

Em 1979, Souza Santos e Albertin apresentaram novamente um trabalho sobre os defeitos encontrados em peças de seção espessa de ferro fundido nodular (31).

Esse trabalho foi baseado nas experiências feitas pelos próprios autores (já citados anteriormente) e completado com novos estudos bibliográficos.

São descritos então os defeitos já conhecidos dos ferros fundidos nodulares de seção espessa e detalhadamente analisados cada um deles. Em seguida, são apresentadas as recomendações para se evitar ou controlar os referidos defeitos através das variáveis de processo:

- matérias-primas
- tratamento de nodulização e inoculação
- composição química base
- adição de elementos de liga
- utilização de coquilhas
- temperatura de vazamento.

Quanto à utilização de coquilhas é citado que a mesma minimiza os efeitos da espessura da seção, pois o aumento da velocidade de resfriamento permite a obtenção de um maior número de nódulos e de porcentagens mais elevadas de nódulos perfeitos, diminui a ocorrência de grafita em grumos e vermicular. O maior número de nódulos e a maior velocidade de resfriamento ajudam a diminuir o acúmulo de elementos segregados nas últimas regiões a se solidificarem. Diminui também a flutuação pela diminuição do tamanho dos nódulos e do tempo transcorrido durante a solidificação.

Em 1980, Hahn apresenta em uma publicação um resumo das características do processo, das limitações e das principais aplicações da fundição de ligas ferrosas em coquilha, em vez do molde de areia (9).

É citado nessa publicação, que as coquilhas metálicas já eram utilizadas em torno de 1500, para fundir as balas para canhões e que somente por volta de 1900 começou na Alemanha a aplicação industrial. Mas, o progresso no uso da coquilha realmente ocorreu durante e após a segunda guerra mundial, especialmente na União Soviética, Polônia e Tchecoslováquia.

Os materiais em geral fundidos em coquilhas são: ferro fundido cinzento, ferro fundido nodular, ferro fundido maleável e aço. Há uma grande variedade de peças fundidas em coquilhas e suas massas em geral variam de 1 a 100 kg, mas podem ser fundidas peças da ordem de 0,1 até 10.000 kg, e as principais indústrias que se utilizam desse processo são as indústrias siderúrgicas, automobilísticas, de peças hidráulicas e eletrotécnicas.

As coquilhas podem ser feitas com os seguintes materiais: cobre, ferro fundido cinzento e nodular, e aço com ou sem elementos de liga. O material mais utilizado é o ferro fundido, pelo baixo custo e fácil confecção, especialmente no caso da coquilha ser pré-fundida.

São citadas a seguir as vantagens e desvantagens da fun-

dição em coquilhas, comparadas com a fundição em moldes de areia.

Vantagens

- maior precisão dimensional (implicando em um menor acréscimo para a usinagem)
- melhor acabamento (apropriado para tratamento da superfície)
- excelente usinabilidade
- alta estanqueidade contra gases e líquidos (devido à estrutura fina)
- melhor rendimento metalúrgico
- aumento da produtividade por pessoa e por área
- menor investimento para o controle ambiental
- condições de trabalho mais favoráveis.

Desvantagens

- dificuldade para fundir peças com secções finas e complicadas
- necessidade de tratamento térmico devido à formação de cementita (exceto nos casos onde se deseja um endurecimento superficial)
- elevado custo da coquilha e tempo de sua confecção
- maior sensibilidade às variações do processo.

Ainda em 1980, Watmough e Hieber realizaram um estudo abordando a influência das velocidades de solidificação e resfriamento na estrutura e na dureza de ferros fundidos nodulares(32).

Nesse trabalho os autores citam que o tempo de solidificação influi diretamente na microestrutura, principalmente na queila originada durante a transformação eutética. Assim, uma ve

locidade de solidificação muito rápida, provoca uma formação maior de carbonetos primários e dentro de certos limites, um aumento no número de nódulos de grafita. Além disso, a velocidade de resfriamento após a solidificação afeta significativamente a microestrutura, principalmente a resultante da transformação eutetóide, alterando as quantidades e as características dos componentes resultantes da transformação da austenita. Há uma alteração nas quantidades relativas de ferrita e perlita da matriz e uma mudança nas características desses componentes, tais como, tamanho de grão da ferrita e espaçamento lamelar da perlita. Esses efeitos são responsáveis pelas alterações das propriedades mecânicas.

Os autores em vez de usarem coquilhas para alterar a velocidade de solidificação, usaram peças planas com diferentes espessuras.

Também no mesmo ano, Motz publicou um trabalho no qual é analisada a influência da utilização de coquilhas na microestrutura e na fratura de ferros fundidos nodulares (33).

Foi constatado que o coquilhamento aumentou a quantidade de perlita da matriz e tornou sua estrutura lamelar mais fina.

Em 1982, Palmer realizou um estudo sobre o efeito da espessura de peças de ferro fundido nodular na resistência à fadiga (34).

O trabalho não trata especificamente da utilização de coquilhas, mas uma das conclusões do autor é que o aumento do tamanho dos nódulos de grafita, bem como a degeneração da sua forma diminui a resistência à tração e à fadiga. Logo, como a utilização de coquilha diminui o tamanho dos nódulos e apresenta efeitos positivos na manutenção de sua forma esferoidal, pode-se concluir que provocará uma melhoria nessas propriedades.

Uma outra aplicação do coquilhamento é a citada por Karsay em um dos capítulos de seu livro publicado em 1975 (3).

Esse capítulo trata da alimentação do ferro fundido nodular de tal forma a evitar o problema relacionado com a contra-

ção da liga. Isso é feito usando-se massalotes adequados ou usando-se coquilhas, que promovem uma solidificação unidirecional. Então, nesse caso a coquilha e o massalote têm a mesma função e quando se usa massalote, não se usa coquilha, exceto quando se quer modificar a microestrutura e melhorar propriedades mecânicas.

A Figura 3.3 apresenta um gráfico empírico que orienta a escolha da espessura da coquilha a ser utilizada, em função da espessura da parede do fundido, para diversas temperaturas de vazamento, com o objetivo de se evitar o problema surgido com a contração.

Como pode ser observado não foram encontrados muitos trabalhos que tratam especifica e diretamente da utilização de coquilhas nos processos de solidificação de ferros fundidos nodulares.

Dos trabalhos existentes, nenhum deles procurou equacionar a variação de propriedades mecânicas ao longo da peça em função da espessura da coquilha. Assim, dada a importância do assunto, procurou-se neste trabalho desenvolver um equacionamento capaz de descrever, em peças de ferro fundido nodular, a variação da dureza em função da distância da interface metal/molde e da relação entre a espessura da coquilha e a espessura da peça.

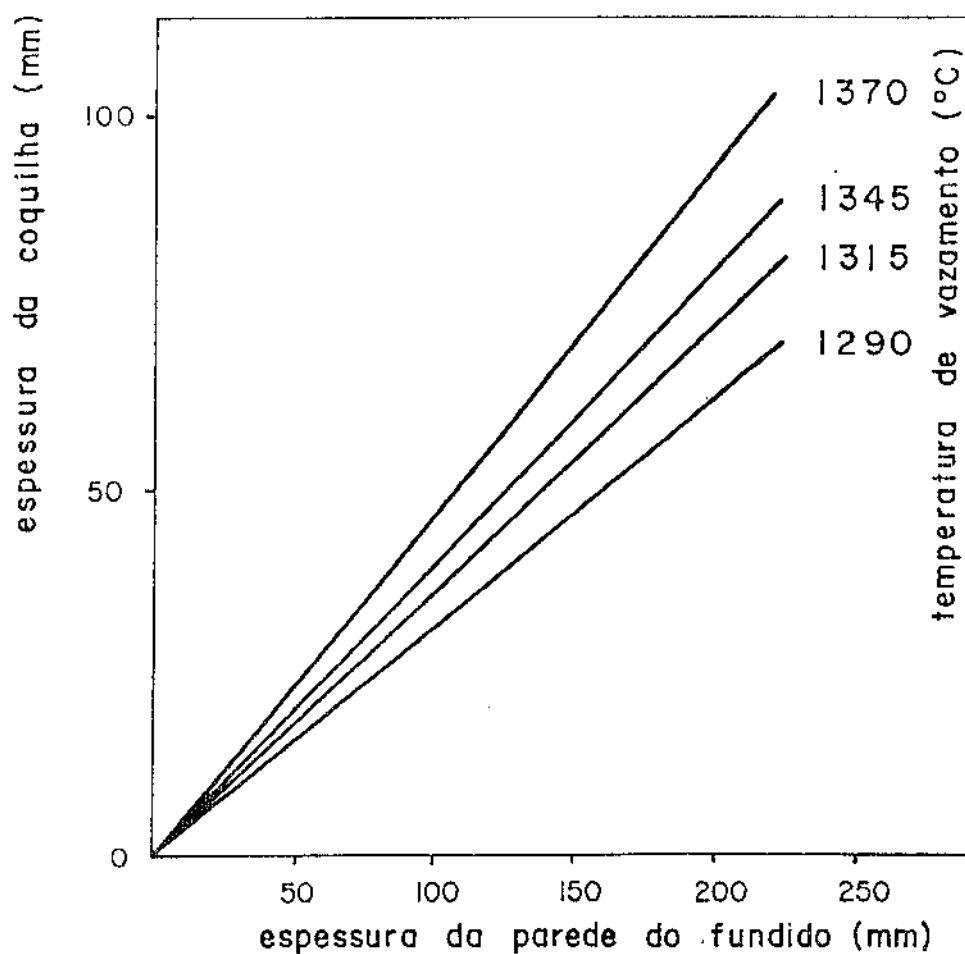


Figura 3.3 - Gráfico que auxilia a escolha da espessura da coquilha em função da espessura da parede do ferro fundido e da temperatura de vazamento, afim de evitar problemas de contração (3).

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 - MATERIAL UTILIZADO

O ferro fundido nodular utilizado nos trabalhos experimentais possui a seguinte composição química:

C = 3,65%
Si = 2,30%
Mn = 0,06%
P = 0,060%
S = traços

a qual corresponde a um carbono equivalente:

CE = 4,36%

Esse ferro fundido nodular quando vazado em molde de areia com o formato de bloco Y, satisfazendo os requisitos da norma NBR 6916/1981, enquadra-se como FE 50007.

4.2 - FUSÃO E VAZAMENTO

O material foi fundido em um forno rotativo a óleo e a temperatura de saída do forno foi de 1.420°C.

Foi em seguida nodulizado com 1,6% de uma liga Fe Si Mg (10% Mg) através do processo sanduíche e inoculado com 0,8% de uma liga Fe Si (75% Si) granulada.

A temperatura de vazamento nos moldes foi de 1.340°C e a temperatura de desmoldagem foi inferior a 100°C.

As temperaturas de saída do forno e vazamento no molde foram medidas com um pirômetro ótico marca LEEDS & NORTHRUP tipo 8627-4.

4.3 - MOLDES UTILIZADOS

Na escolha dos moldes, a idéia básica era a de fundir simultaneamente blocos com dimensões iguais de ferro nodular com coquilhas de diversas espessuras nas superfícies inferiores e paredes isolantes nas demais superfícies de tal forma a forçar um fluxo de calor unidirecional através dessas superfícies inferiores onde estariam as coquilhas ou mesmo a areia (para servir de comparação) (ver Fig.4.1.a). Com isso, cada bloco funcionaria como se fosse uma fatia dentro de uma peça espessa de ferro fundido nodular onde o calor seria extraído através de uma única superfície (ver Fig.4.1.b).

Para tanto, os moldes foram construídos com placas de uma polegada de espessura de material isolante, Kalmin 40, cuja capacidade de isolação é maior que a da areia, como pode ser verificada através da Fig.4.2.

As placas isolantes foram dispostas de forma a servirem de molde, assim, além de produzirem blocos de ferro fundido nodular com formato de um paralelepípedo com dimensões de 30x200x300 mm, ainda isolavam os mesmos, inclusive as superfícies laterais das coquilhas.

As coquilhas foram construídas em aço ABNT 1020 com formato de paralelepípedos de dimensões iguais às dos blocos exceto quanto às espessuras. A espessura dos blocos (H) era constante e igual a 300 mm e as espessuras das coquilhas (h) tinham os seguintes valores: 10, 20, 30, 50, 70 e 100 mm. Quando se fala em espessura de coquilha igual a zero significa que não há coquilha e o bloco de ferro fundido tem a sua face inferior em contato direto com a areia. Isso tudo pode ser visto na Fig.4.3.

4.4 - ENSAIO DE DUREZA

A dureza recomendada para materiais não muito homogêneos como os ferros fundidos é a dureza Brinell, e foi usado como penetrador uma esfera com 10 mm de diâmetro, de carboneto de tungstênio.

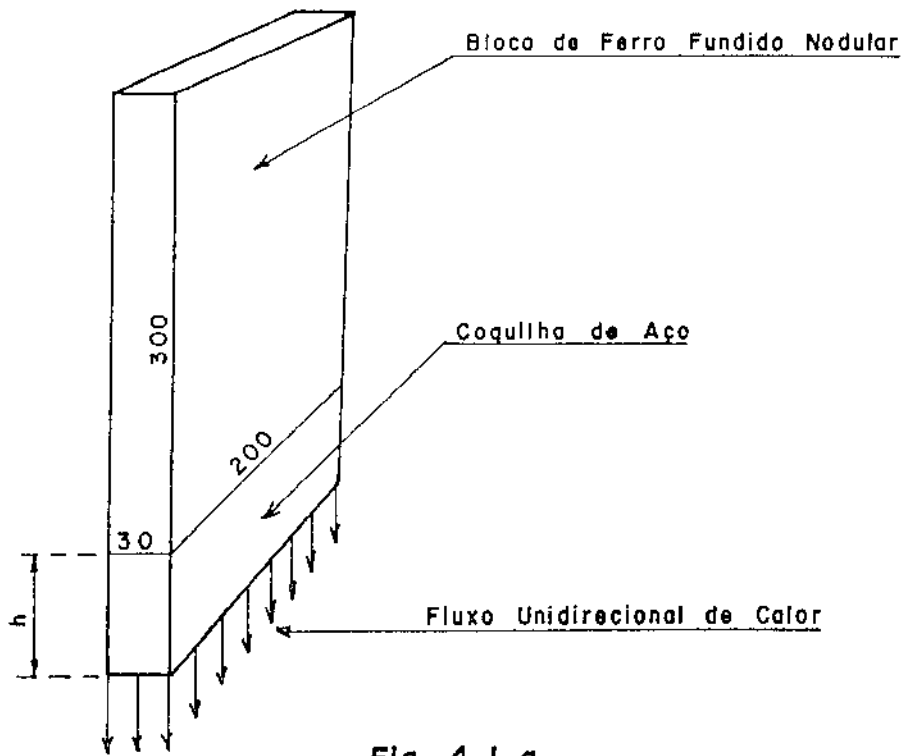


Fig. 4.1.a

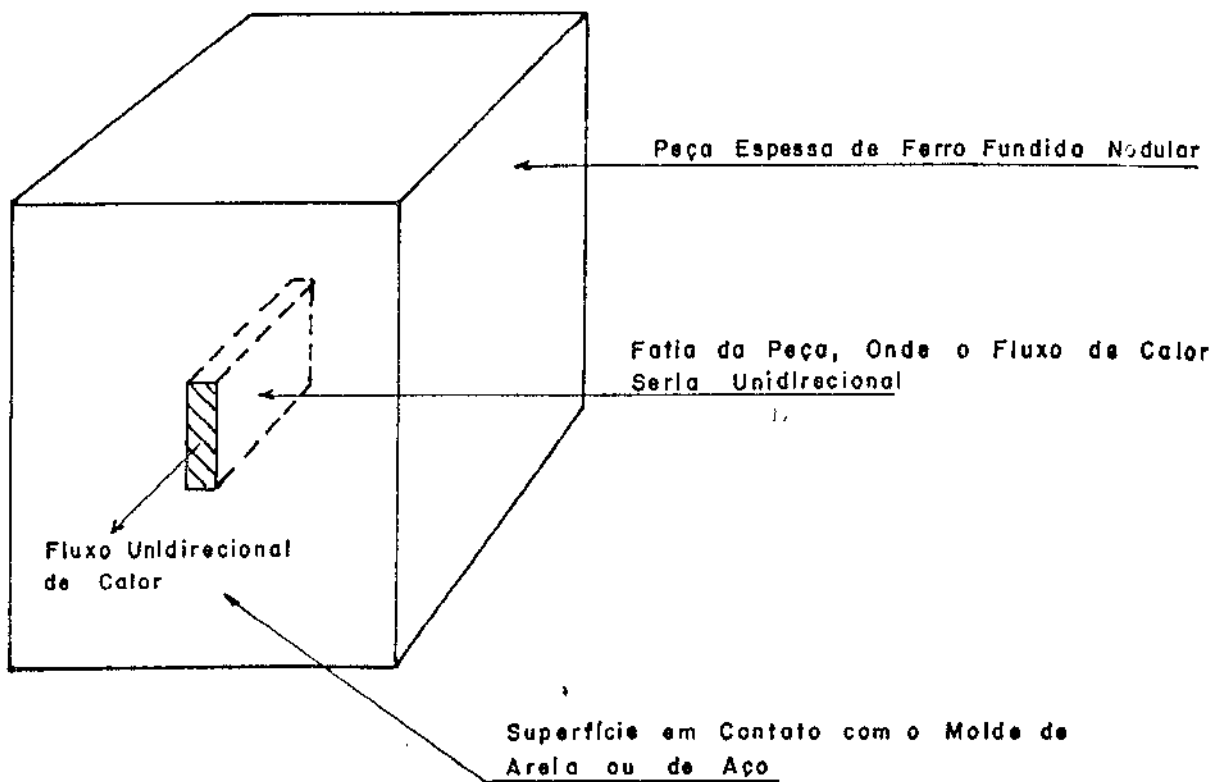


Fig. 4.1.b

Figura 4.1.a - Extração de calor de um bloco de ferro fundido nodular através de uma coquilha de aço.

Figura 4.1.b - Fluxo unidirecional de calor de uma fatia dentro de uma peça espessa de ferro fundido nodular.

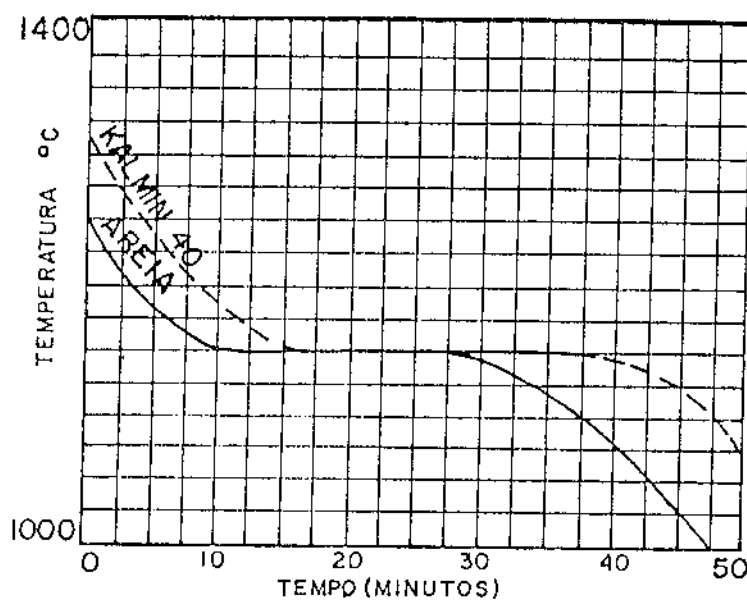


Figura 4.2 - Gráfico que mostra a maior capacidade de isolamento térmico do Kalmin 40 em relação a areia.

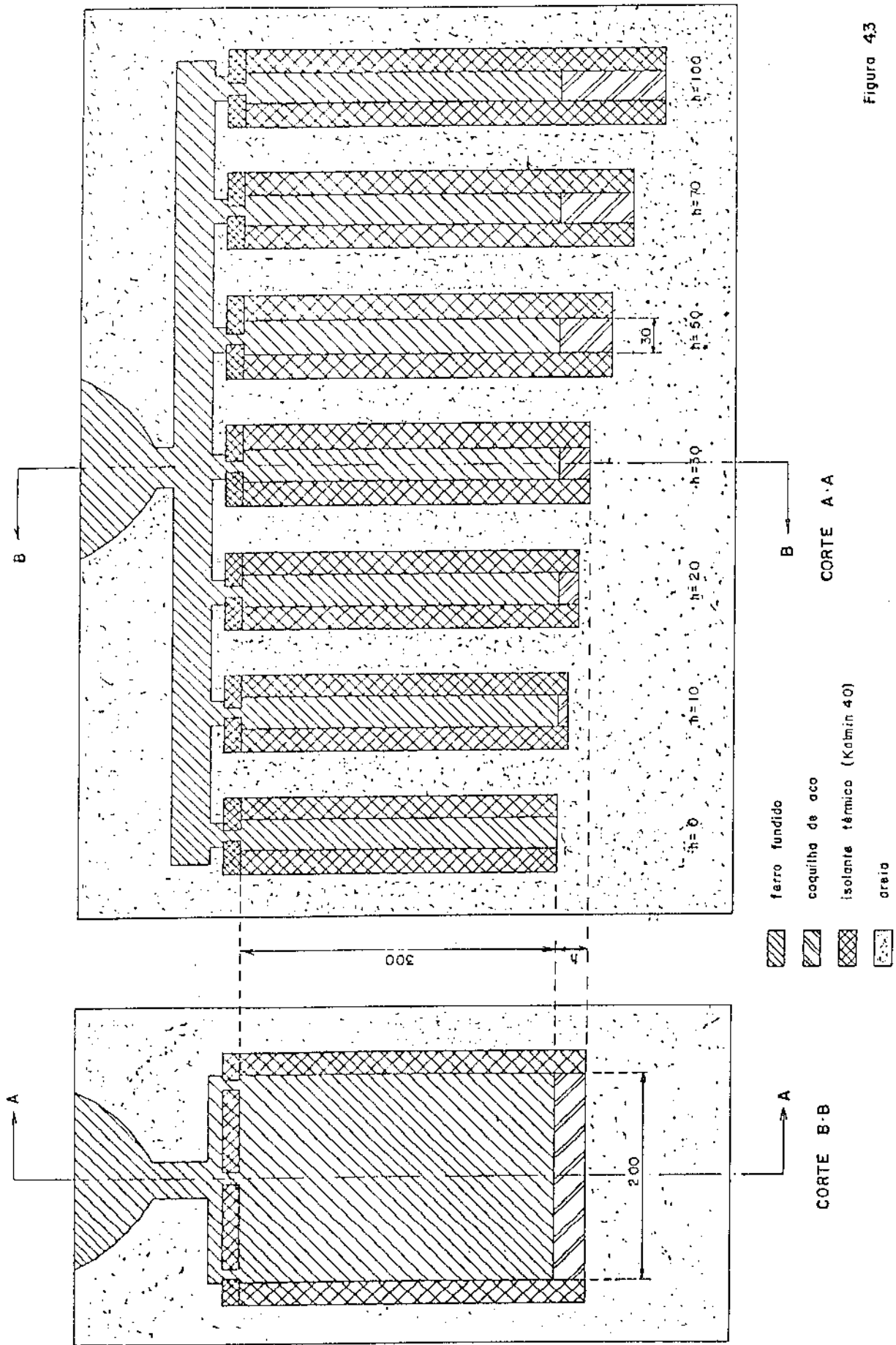


Figura 4.3

Figura 4.3 - Disposição dos blocos de ferro fundido nodular com suas respectivas conuilhas, placas de isolamento e canais de alimentação.

tênio, apropriada para casos de altas durezas (até 630 HB conforme ASTM E 10), como as obtidas nas superfícies coquilhadas e em suas proximidades(36). A carga utilizada foi de 29.420 N (3.000 kgf), dando um grau de carga igual a 30, que é recomendado para este tipo de material. O tempo de permanência da carga foi de 30 s.

A designação abreviada da dureza Brinell em um ponto onde, por exemplo, ela valesse 200, com as condições anteriormente citadas, seria indicada conforme a norma brasileira NBR 6394/80 por (37):

200 HB 10/3000/30

Neste trabalho, como sô se usou a dureza Brinell e em geral nas condições citadas, por facilidade, será indicado apenas o valor da dureza da seguinte forma:

HB = 200 (ainda para o exemplo dado)

O aparelho utilizado foi um durômetro Brinell OTTO WOLPERT-WERKE.

Para se obter os valores da variação de dureza ao longo dos blocos, foi cortada uma fatia em cada bloco, na posição aproximadamente central, no sentido longitudinal. As espessuras dessas fatias eram de 11 mm e as impressões foram feitas em ambos os lados da fatia, com 20 mm de distância entre os centros das impressões. As impressões eram feitas a partir da superfície coquilhada ($x = 0$) e de um lado começava a 10 mm dessa superfície ($x = 10, 30, 50, 70, 90, 110, \dots$) e do outro lado começava a 20 mm dessa superfície ($x = 20, 40, 60, 80, 100, \dots$), desta foram, foram obtidos valores de dureza de 10 em 10 mm a partir da superfície coquilhada. Para as medições de dureza nas superfícies coquilhadas ($x = 0$), foi retirada uma pequena amostra de cada bloco e feitas as impressões nas superfícies coquilhadas das mesmas (ver Fig.4.4).

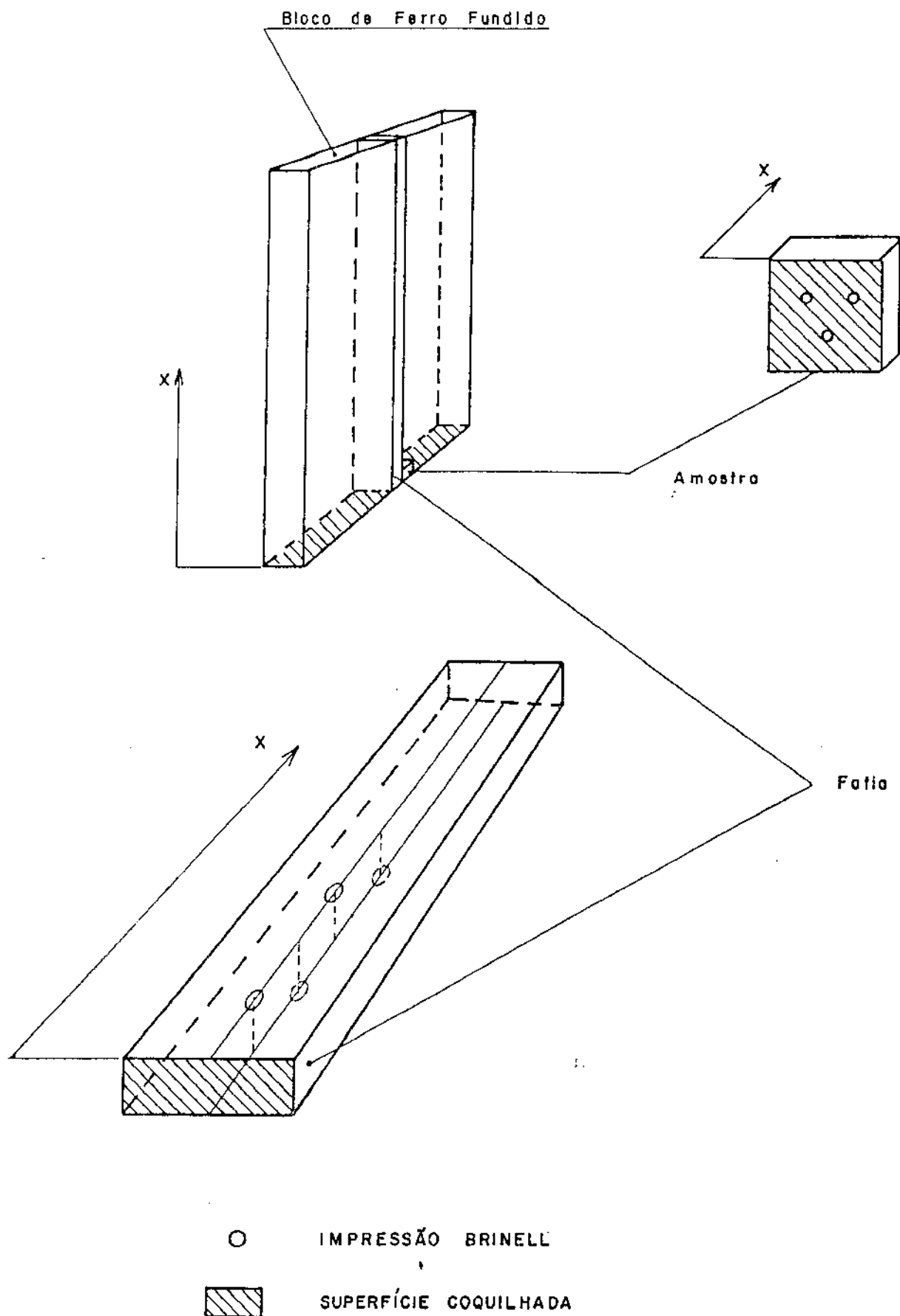


Fig. 4.4

Figura 4.4 - Fatia e amostra retiradas de cada bloco de ferro fundido nodular, para a obtenção das durezas ao longo do mesmo.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS OBTIDOS

5.1 - VARIACÃO DA DUREZA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA A PARTIR DA INTERFACE METAL/MOLDE

Utilizando-se os procedimentos experimentais citados no capítulo anterior, foi determinada a variação da dureza ao longo do bloco a partir da superfície coquilhada, para cada uma das diferentes espessuras de coquilhas utilizadas.

Nas Figuras 5.1 a 5.6 são apresentados os resultados experimentais da variação da dureza, respectivamente para coquilhas com espessura igual a 10, 20, 30, 50, 70 e 100 mm.

Pode-se notar que em todos os casos a dureza assume um valor mais alto junto à superfície coquilhada e decresce continuamente à medida que se afasta desta superfície tendendo a valores aproximadamente constantes.

Nota-se ainda que a dureza junto à superfície é tanto maior quanto mais espessa a coquilha utilizada. Nota-se também, que a forma da variação da dureza ao longo do bloco é semelhante em todos os casos analisados.

A observação dos resultados obtidos permite também, constatar que a influência da coquilha sobre a dureza em cada bloco é bastante mais sensível nos primeiros 25 mm a partir da superfície coquilhada. A partir dessa distância nota-se que há variação menor da dureza tendendo a valor constante. Esse valor constante é tanto maior quanto maior espessura a coquilha utilizada.

Na peça obtida sem o uso de coquilha não foi notada diferença significativa entre as medidas de dureza obtidas na superfície e no interior da peça, assim considerou-se neste trabalho para esse caso um valor médio constante igual a 160 HB.

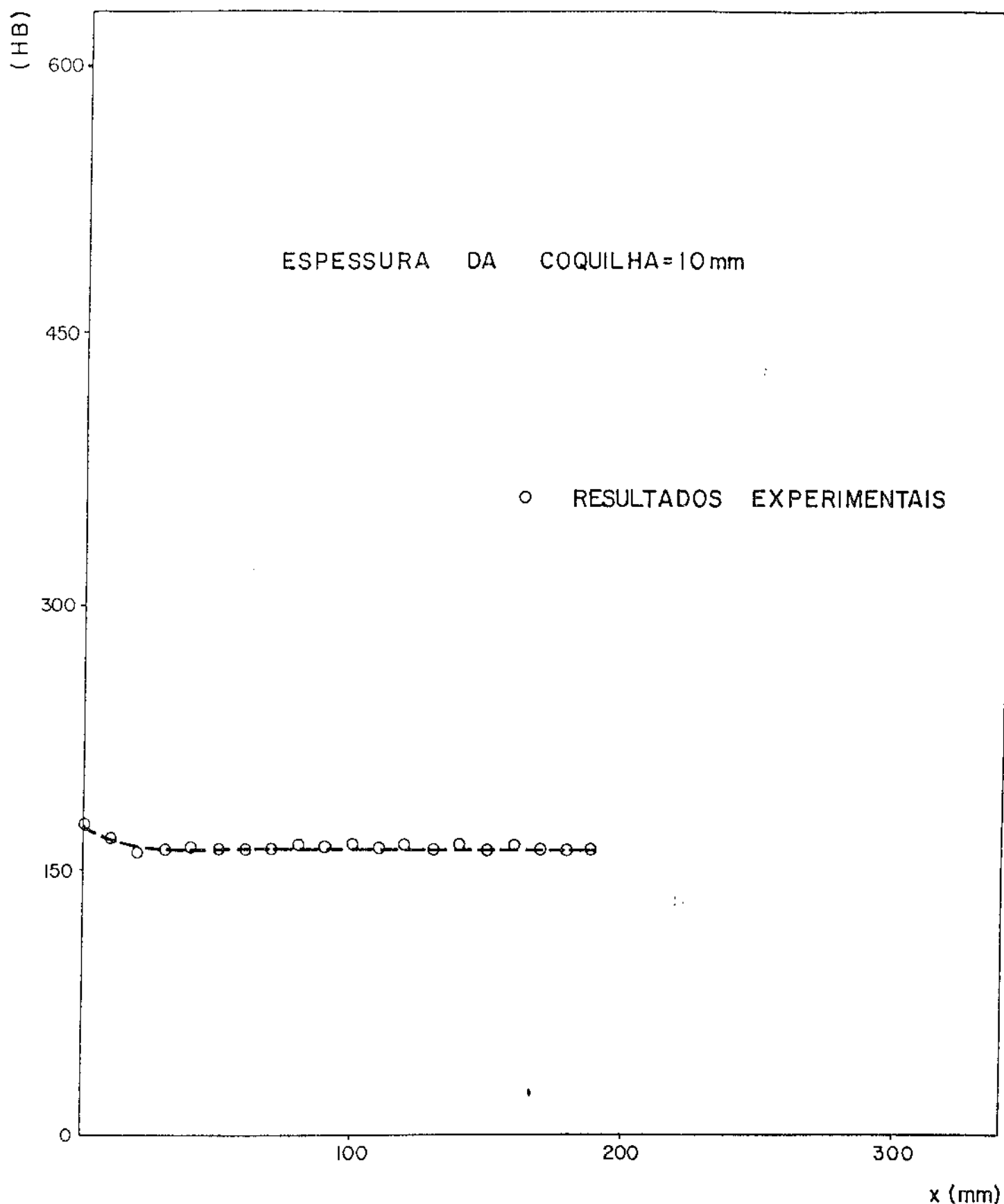


Figura 5.1 - Resultados experimentais da variação da dureza ao longo do bloco de ferro fundido nodular obtida através do uso de coquilha com 10 mm de espessura.

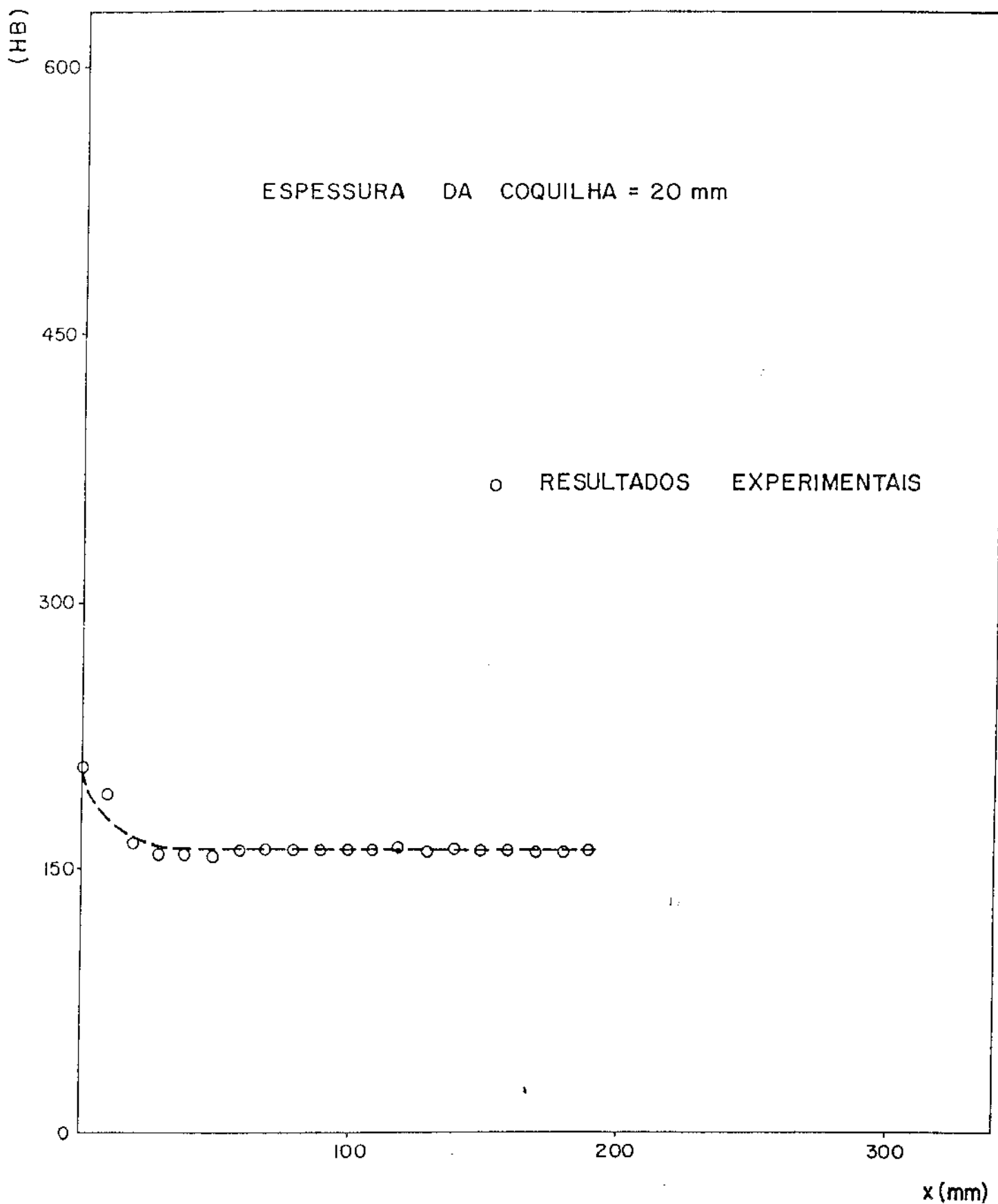


Figura 5.2 - Resultados experimentais da variação da dureza ao longo do bloco de ferro fundido nodular obtida através de uso de coquilha com 20 mm de espessura.

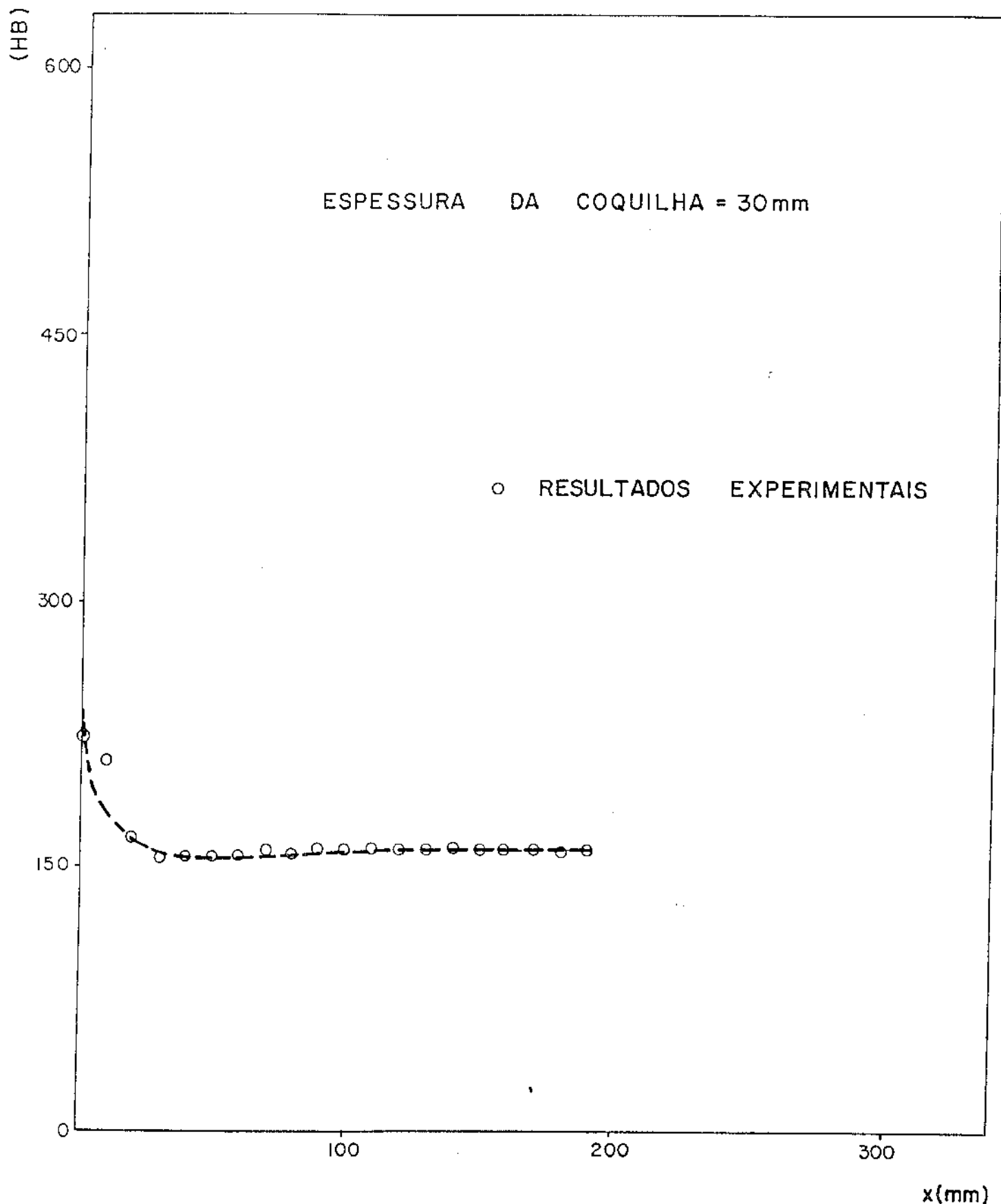


Figura 5.3 - Resultados experimentais da variação da dureza ao longo do bloco de ferro fundido nodular obtida através do uso de coquilha com 30 mm de espessura.

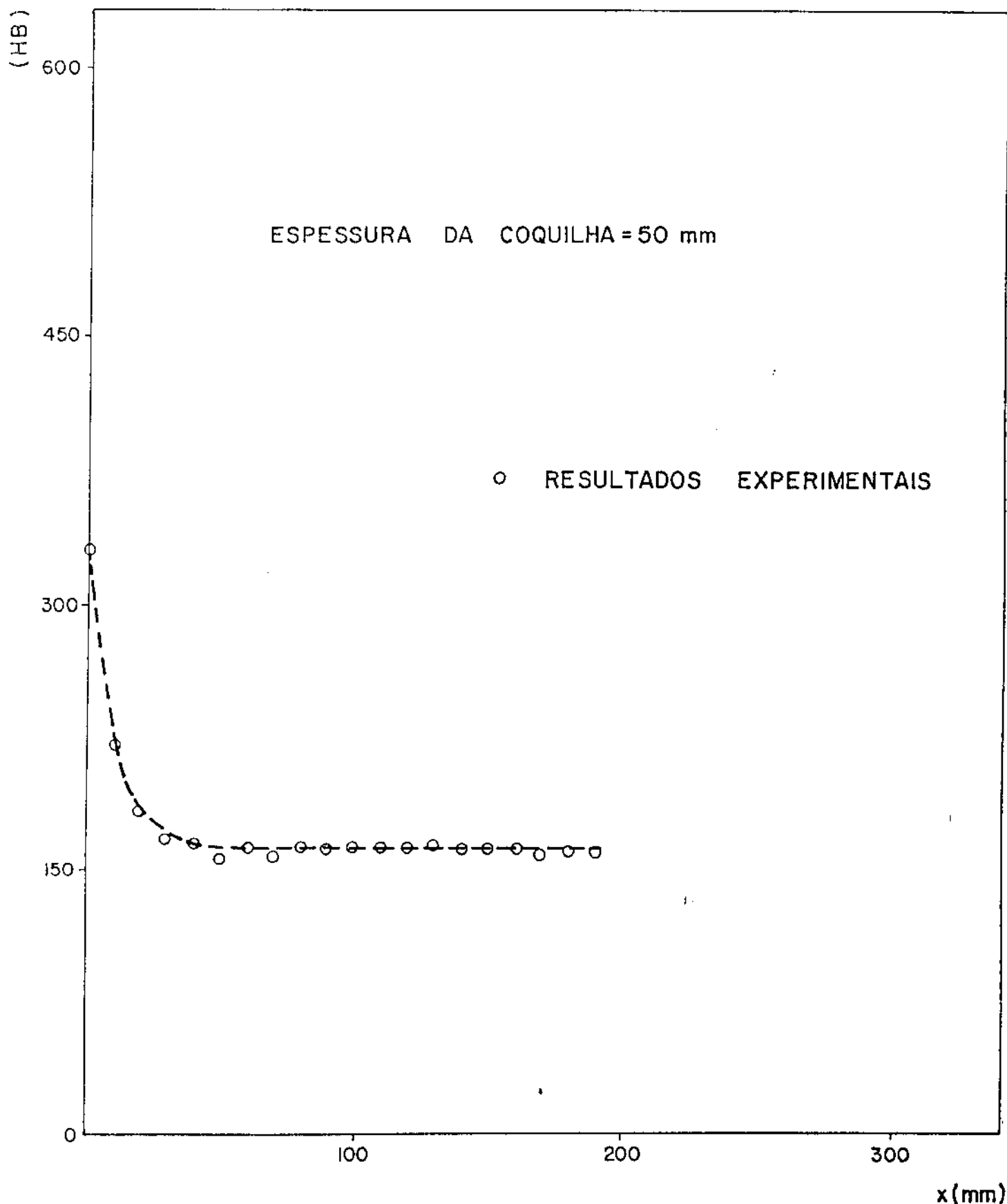


Figura 5.4 - Resultados experimentais da variação da dureza ao longo do bloco de ferro fundido nodular obtida através do uso de coquilha com 50 mm de espessura.

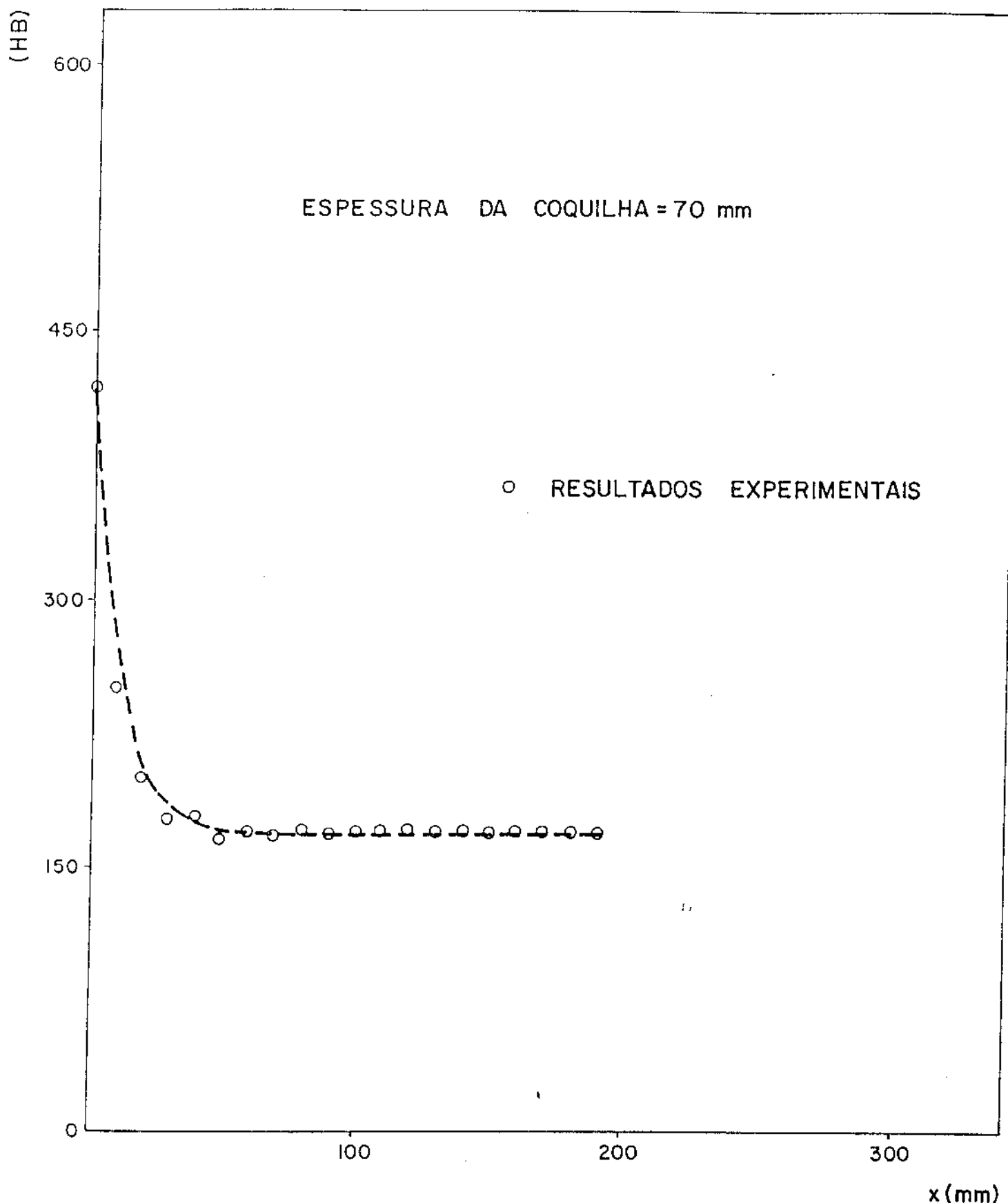


Figura 5.5 - Resultados experimentais da variação da dureza ao longo do bloco de ferro fundido nodular obtida através do uso de coquilha com 70 mm de espessura.

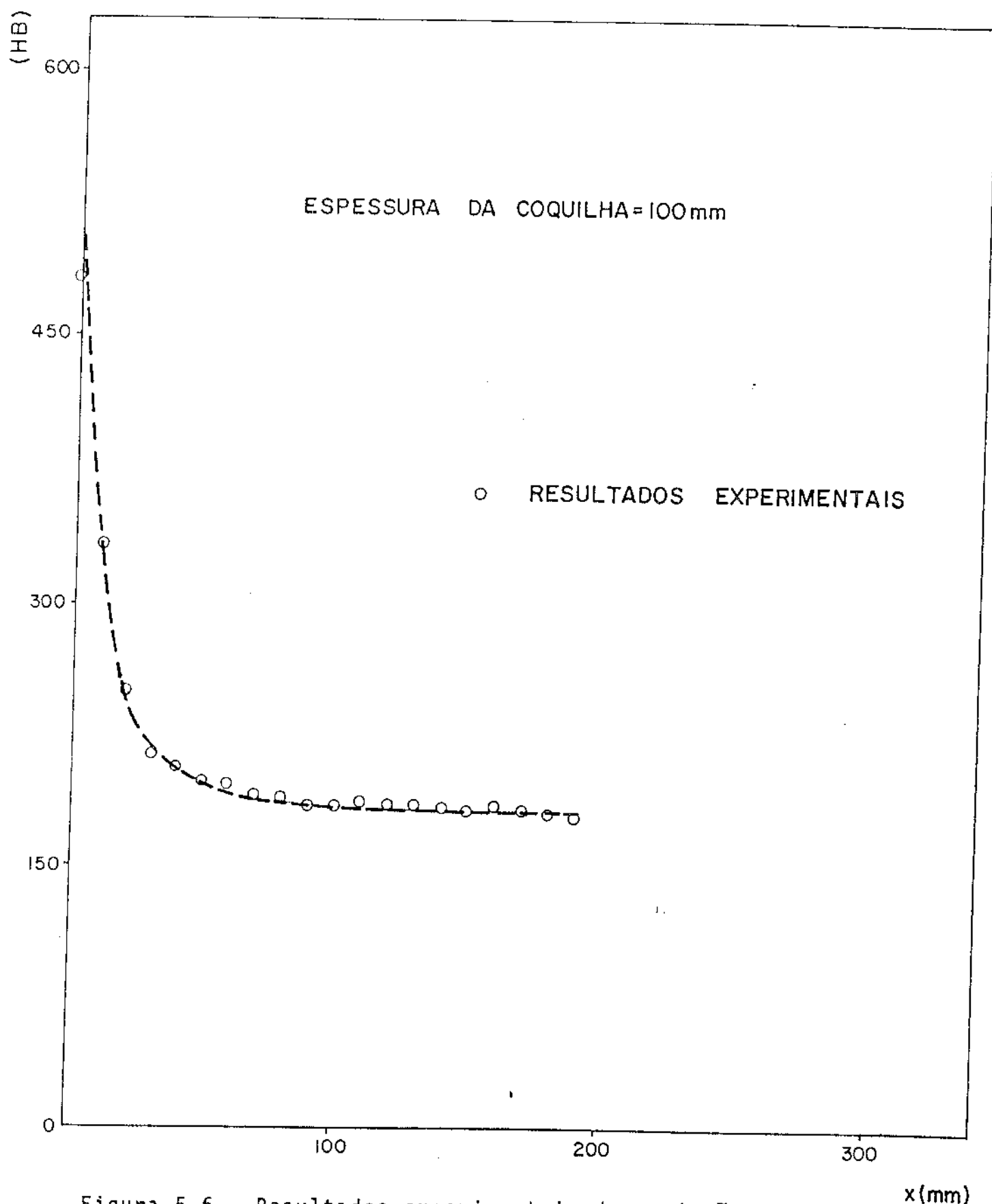


Figura 5.6 - Resultados experimentais da variação da dureza ao longo do bloco de ferro fundido nodular obtida através do uso de coquilha com 100 mm de espessura.

5.2 - VARIAÇÃO DA DUREZA EM UMA MESMA DISTÂNCIA DA SUPERFÍCIE COQUILHADA EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DA COQUILHA

Utilizando-se os valores da dureza obtidos em cada um dos blocos, é possível se determinar como varia a dureza em uma mesma distância de superfície coquilhada quando se varia a espessura da coquilha.

Na Figura 5.7 é apresentada essa variação para os dois casos limites, ou seja, junto à superfície coquilhada e a uma distância grande o suficiente para que a dureza atinja um valor aproximadamente constante.

Pode-se notar que dentro de certos limites, a dureza cresce com o aumento da espessura da coquilha.

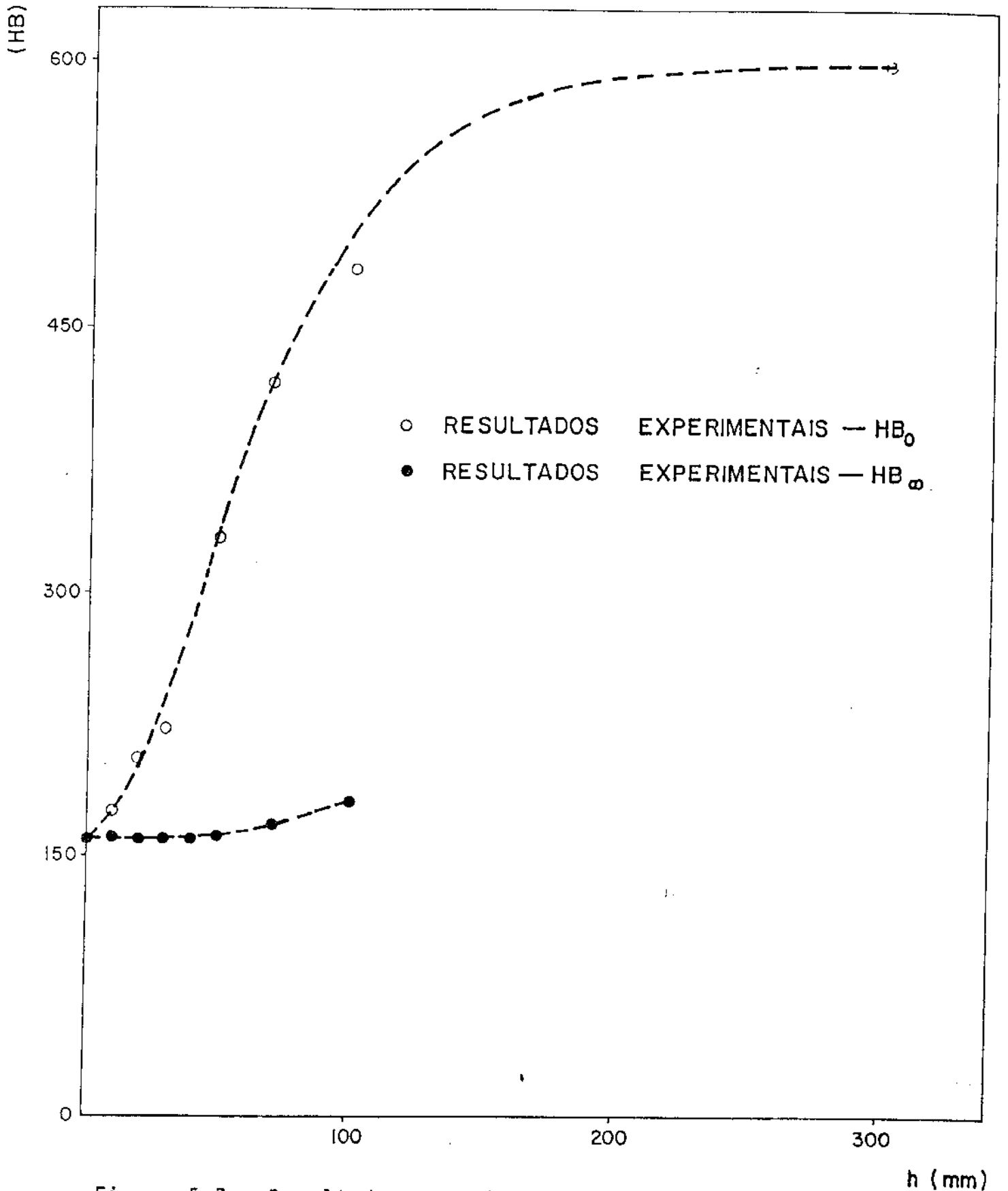


Figura 5.7 - Resultados experimentais da dureza na superfície coquilhada (HB_0) de cada bloco de ferro fundido nodular e em um ponto bastante distante dessa superfície (HB_∞), para cada espessura de coquilha utilizada.

CAPÍTULO 6

DESENVOLVIMENTO DE EQUAÇÕES PARA ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA DUREZA EM FERROS FUNDIDOS NODULARES COQUILHADOS

6.1 - VARIAÇÃO DA DUREZA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DA SUPERFÍCIE COQUILHADA

A observação dos resultados experimentais apresentados nas figuras 5.1 a 5.6 mostra que a variação da dureza com a distância da interface metal/molde apresenta uma forma bem definida e é semelhante para todas as espessuras de coquilhas utilizadas. Tal fato sugere a existência de uma equação matemática capaz de descrever essa variação. Para o desenvolvimento de tais equações, um primeiro fator a ser levado em conta, é que para cada espessura da coquilha utilizada, a dureza atinge um valor máximo na superfície coquilhada (interface metal/molde) e decresce continuamente a medida que aumenta a distância desta superfície, tendendo a um valor constante. É importante notar que para cada espessura de coquilha existe um valor característico da dureza máxima e da dureza constante, que são tanto maiores quanto mais espessa a coquilha.

Dessa forma, as condições de contorno necessárias para tal equação, são que ela apresente um valor máximo quando a distância (x) da superfície coquilhada for nula e um valor constante à medida que essa distância aumenta. Ou seja, chamando de " HB_x " a dureza a uma distância " x " da superfície, de " HB_0 " a dureza na superfície coquilhada e de " HB_∞ " o valor constante da dureza, tem-se para cada espessura (h) de coquilha:

$$\text{em } x = 0 \quad , \quad (HB_x)_h = (HB_0)_h \quad (6.1)$$

$$\text{em } x \rightarrow \infty \quad , \quad (HB_x)_h = (HB_\infty)_h \quad (6.2)$$

O sub-índice "h" refere-se à espessura de coquilha que está sendo utilizada.

A simbologia completa dos termos utilizados é apresentada no apêndice.

Além dessas condições de contorno, a equação procurada deve descrever a variação da dureza em função de "x" entre os dois valores limites.

As evidências experimentais (resultados apresentados nas Figuras 5.1 a 5.6) parecem indicar que uma equação baseada na função exponencial pode ser aplicada para descrever a variação da dureza com a distância da superfície coquilhada. Tal equação pode então ser colocada na seguinte forma geral:

$$(HB_x)_h = B_1 + B_2 e^{-Ax} \quad (6.3)$$

onde A, B₁ e B₂ são constantes para cada valor de "h".

Esta equação deve, evidentemente, satisfazer as condições de contorno apresentadas nas equações (6.1) e (6.2).

Assim, de (6.2) e (6.3) tem-se:

$$B_1 = (HB_\infty)_h \quad (6.4)$$

e de (6.1) e (6.3):

$$B_1 + B_2 = (HB_0)_h \quad (6.5)$$

Substituindo-se (6.4) em (6.5) tem-se:

$$B_2 = (HB_0)_h - (HB_\infty)_h \quad (6.6)$$

logo, substituindo-se (6.4) e (6.6) em (6.3) obtêm-se:

$$(HB_x)_h = (HB_\infty)_h + \left[(HB_0)_h - (HB_\infty)_h \right] e^{-Ax} \quad (6.7)$$

Para permitir uma utilização mais generalizada da equação (6.7) seria conveniente dispor-se de uma equação capaz de correlacionar as constantes " HB_0 " e " HB_∞ " com a espessura " h " da coquilha. Como sã se dispõe de duas condições de contorno não foi possível determinar-se a constante " A " da equação (6.7) e, pela mesma razão seria conveniente dispor-se também de uma relação, mesmo que empírica, capaz de correlacioná-la com a espessura " h " da coquilha. O desenvolvimento dessas equações será apresentado nos itens a seguir.

6.2 - VARIAÇÃO DA DUREZA (HB_0) NA SUPERFÍCIE COQUILHADA ($x = 0$) EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DA COQUILHA

O aumento da espessura da coquilha exerce uma influência efetiva na variação da dureza enquanto provoca um aumento sensível na velocidade de solidificação e resfriamento, ou seja, enquanto a mesma não atingir uma espessura que possa ser considerada semi-infinita.

Considera-se que uma coquilha apresenta espessura semi-infinita quando a superfície externa da mesma não se aquece até o final da solidificação.

Segundo experiências realizadas por Sciama, para o ferro fundido nodular a coquilha pode ser considerada semi-infinita quando apresenta uma espessura igual à espessura de metal a ser solidificado (35). Assim, neste trabalho, como os blocos fundidos têm 300 mm de espessura, a coquilha poderá ser considerada semi-infinita quando apresentar esta espessura. Para coquilhas de espessuras maiores que esta, os valores de dureza não deverão apresentar alterações e estes valores serão valores máximos atingidos.

Na realização das experiências, a maior espessura de coquilha utilizada foi 100 mm, não sendo portanto, atingida a dureza máxima (correspondente à espessura de 300 mm). No entanto, segundo Angus esse valor máximo de dureza para ferros fundidos coquilhados é da ordem de 600 HB (11). Assim, foi adotado esse valor para o caso do uso de coquilha semi-infinita.

A análise dos resultados apresentados na Figura 5.7, permite observar a forma da variação da dureza na superfície coquilhada (HB_0) com a espessura da coquilha. Uma equação capaz de descrever essa variação deve apresentar um valor inicial de dureza correspondente ao caso da fundição sem coquilha, deve ainda aumentar continuamente até um valor máximo para a espessura correspondente à coquilha semi-infinita e permanecer constante nesse valor para espessuras maiores de coquilha.

A equação deve então apresentar as seguintes condições de contorno:

$$\text{em } h = 0, \quad (HB_0)_h = (HB_0)_0 \quad (6.8)$$

$$\text{em } h \rightarrow \infty, \quad (HB_0)_h = (HB_0)_\infty \quad (6.9)$$

onde $(HB_0)_0$ e $(HB_0)_\infty$ representam respectivamente, os valores mínimo e máximo da dureza nas superfícies dos blocos, correspondendo aos casos de fundição sem utilização de coquilha e com utilização de coquilha semi-infinita.

Uma função que pode satisfazer essas condições é a função tangente hiperbólica, definida como:

$$\tanh x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (6.10)$$

Observa-se ainda que para descrever o fenômeno a função procurada deve levar em conta a ocorrência de uma inflexão entre os valores máximo e mínimo.

Para que a função tangente hiperbólica apresente essa inflexão, concluiu-se após alguma manipulação dessa função que ela deve ser elevada a um certo expoente, conforme pode ser observado na Figura 6.1. Um fato importante que deve ser levado em conta, é que a espessura (h) da coquilha simplesmente não é suficiente para descrever sua influência no resfriamento dos blocos, já que uma determinada espessura de coquilha será mais ou menos eficiente dependendo da menor ou maior espessura (H) do bloco. Ou seja, por exemplo uma coquilha de 20 mm pode ser considerada pequena para um bloco com espessura de 200 mm, mas, é bastante significativa para um bloco de 40 mm. Assim, sempre que se for considerar em uma equação a espessura de coquilha ela será colocada em termos da sua relação com a espessura da peça (h/H).

Dessa forma, a equação que descreve a variação da dureza na superfície (HB_0) com a espessura de coquilha deve apresentar a seguinte forma geral:

$$(HB_0)_h = C_1 + C_2 \tanh^{D_1} \left(D_2 \frac{h}{H} \right) \quad (6.11)$$

onde "h" é a espessura da coquilha e "H" é a espessura do bloco fundido.

Assim, de (6.8) e (6.11) tem-se: „

$$C_1 = (HB_0)_0 \quad (6.12)$$

e de (6.9) e (6.11) tem-se:

$$C_1 + C_2 = (HB_0)_\infty \quad (6.13)$$

Substituindo-se (6.12) em (6.13) tem-se:

$$C_2 = (HB_0)_\infty - (HB_0)_0 \quad (6.14)$$

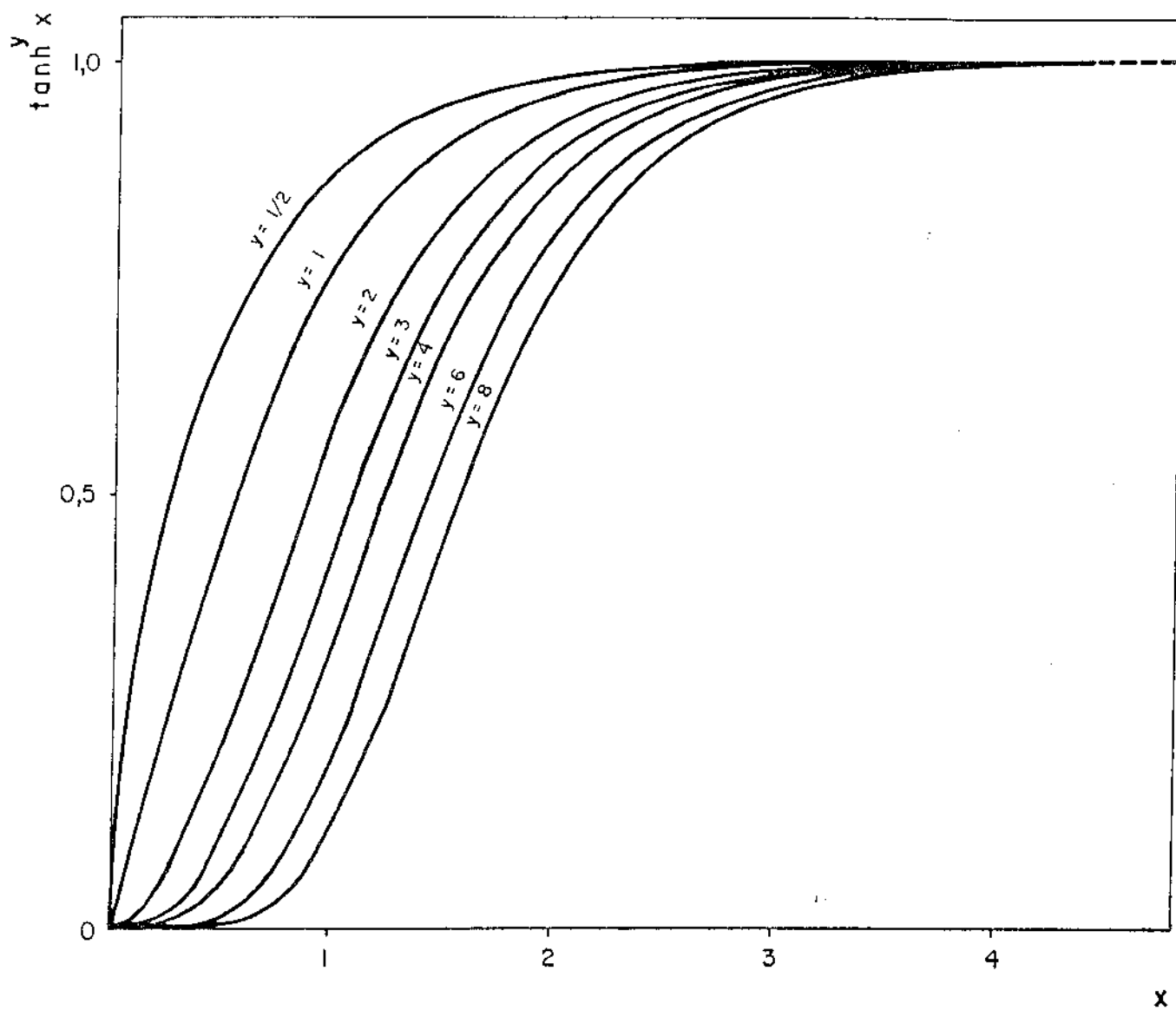


Figura 6.1 - Representação gráfica da função $\tanh^y x$ para diversos valores de "y".

logo, substituindo-se (6.12) e (6.14) em (6.11) obtêm-se:

$$(HB_o)_h = (HB_o)_o + \left[(HB_o)_\infty - (HB_o)_o \right] \tanh^{D_1} \left(D_2 \frac{h}{H} \right) \quad (6.15)$$

Resta agora determinar os valores de D_1 e D_2 . Para tanto, foi derivada a equação (6.15) para se obter a seguinte equação que dá a inclinação da curva:

$$\frac{d (HB_o)_h}{d z} = \left[(HB_o)_\infty - (HB_o)_o \right] D_1 \cdot \tanh^{(D_1-1)} z \cdot \text{sech}^2 z \quad (6.16)$$

onde:

$$z = D_2 \frac{h}{H} \quad (6.17)$$

A equação (6.16) foi derivada obtendo-se a seguinte equação que é derivada segunda da equação (6.15).

$$\frac{d^2 (HB_o)_h}{d z^2} = \left[(HB_o)_\infty - (HB_o)_o \right] D_1 \cdot \tanh^{D_1} z \cdot \text{sech}^2 z \left[\tanh^{-2} z \cdot \text{sech}^2 z \cdot (D_1 - 1) - 2 \right] \quad (6.18)$$

No ponto de inflexão da curva a equação (6.18) iguala-se a zero, logo:

$$\left[(HB_o)_\infty - (HB_o)_o \right] D_1 \cdot \tanh^{D_1} z \cdot \text{sech}^2 z \left[\tanh^{-2} z \cdot \text{sech}^2 z \cdot (D_1 - 1) - 2 \right] = 0 \quad (6.19)$$

Como $(HB_o)_\infty$, $(HB_o)_o$, " D_1 ", $\text{sech} z$ e " z " são diferentes de zero, para a equação (6.19) ser igual a zero deve-se ter:

$$\tanh^{-2} z \cdot \text{sech}^2 z \cdot (D_1 - 1) - 2 = 0 \quad (6.20)$$

fazendo-se algumas transformações através de relações entre funções hiperbólicas obtêm-se de (6.20):

$$\frac{1}{\sinh^2 z} (D_1 - 1) = 2 \quad (6.21)$$

O valor de "z" no ponto de inflexão e os valores de "D₁" e "D₂", quando introduzidos nas equações (6.15), (6.16) e (6.21) devem fornecer valores coerentes com aqueles obtidos da curva experimental.

Da Figura 6.1 nota-se que somente valores acima de "D₁" igual a "1" as curvas apresentam ponto de inflexão. Comparando-se as Figuras 5.7 e 6.1 nota-se que o valor de "D₁" deve, aparentemente, situar-se em torno de "2".

Adotando-se valores de "D₁" próximos de 2 e introduzindo-se na equação (6.21) foram obtidos correspondentes valores de "z" no ponto de inflexão. Introduzindo-se cada par de valores de "D₁" e "z" na equação (6.15), sabendo-se que:

$$(HB_o)_o = 160 \quad e \quad (6.22)$$

$$(HB_o)_\infty = 600 \quad (6.23)$$

obtêm-se valores $(HB_o)_h$ que devem corresponder ao ponto de inflexão. Evidentemente somente quando os valores de "D₁" e "z" forem corretos o valor de $(HB_o)_h$ será o correspondente ao ponto de inflexão.

Com os valores de $(HB_o)_h$ obtidos foram determinados através da curva experimental (Fig. 5.7) os correspondentes valores de "h". Substituindo-se esses valores de "h" juntamente com os valores de "z" correspondentes, na equação (6.17) foram obtidos valores de "D₂".

Os valores corretos de "z", "D₁" e "D₂" introduzidos na equação (6.16) devem fornecer a inclinação da curva que deve ser igual ao valor da inclinação (no ponto de inflexão) da curva experimental que apresenta os valores de $(HB_o)_h$ em função de "z".

Após uma série de tentativas constatou-se que o valor de "D₁" igual a "1,7" é o mais conveniente.

Realmente, substituindo-se esse valor na equação (6.21) obtêm-se um valor de "z" igual a "0,56". Substituindo-se esses valores de "D₁" e "z" na equação (6.15) obtêm-se um valor de $(HB_o)_h$ igual a "300". Este valor de dureza corresponde, na curva experimental, a um valor de "h" igual a "42 mm", que introduzido na equação (6.17) juntamente com o valor de "z" fornece um valor de "D₂" igual a "4". Introduzindo-se os valores de "z" e "D₁" na equação (6.16) obtêm-se o valor da inclinação da curva, no ponto de inflexão, igual a "345". Esse valor, evidentemente, deve coincidir com o valor da inclinação no ponto de inflexão da curva obtida através dos resultados experimentais. De fato, convertendo-se os valores de "h" da curva experimental em valores de "z" através da equação (6.17) e obtendo-se a inclinação da curva no ponto de inflexão (z = 0,56) obtêm-se um valor igual a "341" indicando que os valores obtidos de "D₁", "D₂" e "z" são corretos.

Logo, substituindo-se:

$$D_1 = 1,7 \quad (6.24)$$

$$D_2 = 4 \quad (6.25)$$

em (6.15) obtêm-se a equação na sua forma final:

$$(HB_o)_h = (HB_o)_o + \left[(HB_o)_\infty - (HB_o)_o \right] \tanh^{1,7} \left(4 \frac{h}{H} \right) \quad (6.26)$$

6.3 - VARIACÃO DA DUREZA (HB_{∞}) OBSERVADA EM POSIÇÕES BASTANTE
AFASTADAS DA SUPERFÍCIE COQUILHADA $(x \rightarrow \infty)$ EM FUNÇÃO DA ES-
PESSURA DA COQUILHA

A equação que representa a variação de dureza em função da espessura de coquilha para distância "x" tendendo ao infinito deve apresentar uma forma semelhante àquela desenvolvida no item anterior para "x" igual a zero, ou seja:

$$(HB_{\infty})_h = E_1 + E_2 \tanh^{F_1} \left(F_2 \frac{h}{H} \right) \quad (6.27)$$

e deve satisfazer as seguintes condições de contorno:

$$\text{em } h \rightarrow \infty, (HB_{\infty})_h = (HB_{\infty})_{\infty} \quad (6.28)$$

$$\text{em } h = 0, (HB_{\infty})_h = (HB_{\infty})_0 \quad (6.29)$$

Como foi citado anteriormente será adotado um valor constante para a dureza em toda a extensão do bloco fundido sem coquilha, logo:

$$(HB_{\infty})_0 = (HB_0)_0 = 160 \quad (6.30)$$

e então:

$$\text{em } h = 0, (HB_{\infty})_h = (HB_0)_0 \quad (6.31)$$

De (6.27) e (6.31):

$$E_1 = (HB_0)_0 \quad (6.32)$$

e de (6.27) e (6.28):

$$E_1 + E_2 = (HB_{\infty})_{\infty} \quad (6.33)$$

substituindo (6.32) em (6.33):

$$E_2 = (HB_{\infty})_{\infty} - (HB_0)_0 \quad (6.34)$$

Como não existem razões evidentes para que o coeficiente "F₂" seja diferente do coeficiente "D₂" obtido no item anterior, será considerado que:

$$F_2 = D_2 = 4 \quad (6.35)$$

No entanto, analisando a Figura 5.7 nota-se que a inflexão da curva para x tendendo ao infinito vai ocorrer em um valor de espessura de coquilha maior que no caso anterior (x = 0). Comparando-se as Figuras 5.7 e 6.1 nota-se então, que o expoente F₁ da função deverá neste caso apresentar um valor maior que o do expoente D₁ correspondente ao caso anterior.

Como já foi constatado anteriormente (Capítulo 5), através das curvas experimentais da dureza em função da posição no bloco (x), a influência maior das coquilhas ocorre nos primeiros 25 mm a partir das superfícies coquilhadas. De fato, análises dos resultados experimentais da dureza em função da espessura de coquilha para cada valor de "x" a partir das superfícies coquilhadas, mostram que as variações maiores do expoente "F₁" ocorrem até um valor em torno de 25 mm sendo que para valores de "x" acima deste valor pode-se considerar um expoente constante. Evidências experimentais mostraram que este valor é:

$$F_1 = 6 \quad (6.36)$$

Logo de (6.27), (6.32), (6.34), (6.35) e (6.36) tem-se a equação de dureza na sua forma final, ou seja:

$$(HB_{\infty})_h = (HB_0)_0 + \left[(HB_{\infty})_{\infty} - (HB_0)_0 \right] \tanh^6 \left(4 \frac{h}{H} \right) \quad (6.37)$$

Resta agora determinar o valor da constante $(HB_{\infty})_{\infty}$ que não

foi determinado experimentalmente.

A derivada segunda da equação (6.37) em relação a "z" é dada por:

$$\frac{d^2(HB_{\infty})_h}{dz^2} = \frac{[(HB_{\infty})_{\infty} - (HB_0)_0]}{(5 \cdot \tanh^{-2}z \cdot \operatorname{sech}^2z - 2)} \cdot 6 \cdot \tanh^6z \cdot \operatorname{sech}^2z. \quad (6.38)$$

onde,

$$z = 4 \frac{h}{H} \quad (6.39)$$

A equação (6.38) é igual a zero no ponto de inflexão e para que isso ocorra deve-se ter:

$$5 \cdot \tanh^{-2}z \cdot \operatorname{sech}^2z - 2 = 0 \quad (6.40)$$

ou, através de transformações baseadas nas relações entre as funções hiperbólicas:

$$\frac{5}{\sinh^2z} = 2 \quad (6.41)$$

logo, no ponto de inflexão:

$$z = 1,24 \quad (6.42)$$

como:

$$H = 300 \text{ mm} \quad (6.43)$$

de (6.39), (6.42) e (6.43):

$$h = 93 \text{ mm} \quad (6.44)$$

Entrando com este valor na curva experimental (Figura 5.7) obtêm-se:

$$(HB_{\infty})_{9.3} = 178 \tag{6.45}$$

introduzindo-se (6.30), (6.43), (6.44) e (6.45) em (6.37) obtêm-se:

$$(HB_{\infty})_{\infty} \cong 210 \tag{6.46}$$

6.4 - DETERMINAÇÃO DO EXPOENTE "A" DA EQUAÇÃO QUE DESCREVE A VARIACÃO DA DUREZA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DA SUPERFÍCIE COQUILHADA

Como citado anteriormente, não se dispõe de condições de contorno que permita determinar o coeficiente "A" da equação (6.7). Então, após o desenvolvimento das equações (6.26) e (6.37) que permitem determinar respectivamente os valores de (HB_0) e (HB_{∞}) para cada valor de "h", substituindo-se na equação (6.7) esses valores, juntamente com os valores experimentais de (HB), foram determinados valores empíricos de "A" para os diversos casos estudados.

Utilizando-se este procedimento, observou-se que os valores de "A" permaneciam praticamente constantes quando as espessuras de coquilha eram pequenas, no entanto, a partir de um certo valor de espessura de coquilha, o expoente "A" passava a decrescer até atingir um valor constante quando a coquilha se tornava semi-infinita. Tal comportamento sugeriu que a variação de "A" poderia também ser descrita por uma equação baseada na função tangente hiperbólica. Empiricamente chegou-se então à seguinte equação:

$$A = 0,1 - 0,04 \tanh^6 \left(4 \frac{h}{H} \right) \tag{6.47}$$

Essa equação está representada através do gráfico da Figura 6.2.

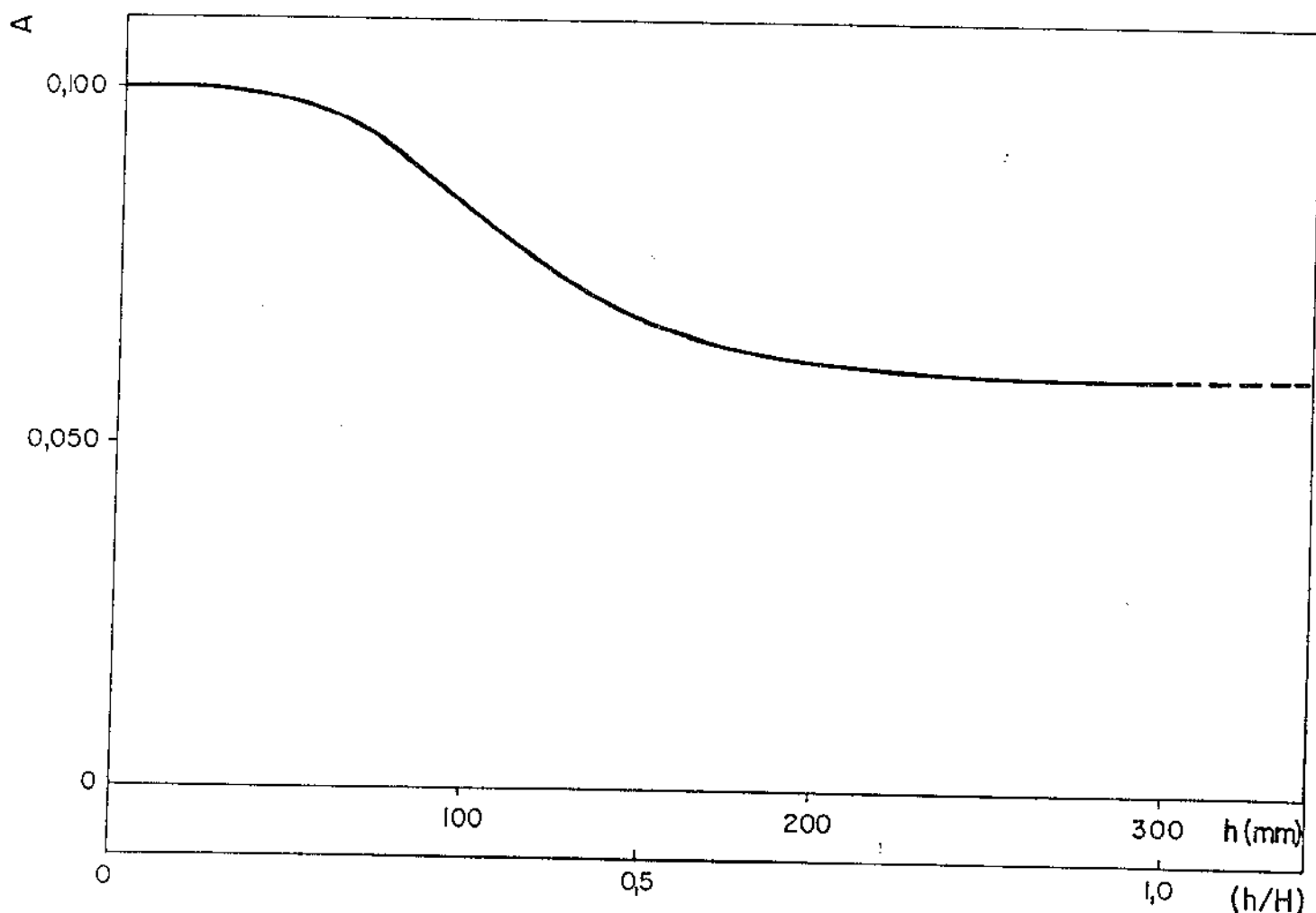


Figura 6.2 - Representação gráfica da equação (6.47) que descreve a variação do expoente "A" em função da espessura da coquilha.

CAPÍTULO 7

APLICAÇÃO E COMPROVAÇÃO DAS EQUAÇÕES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

7.1 - APLICAÇÃO E COMPROVAÇÃO DAS EQUAÇÕES

Aplicando-se a equação (6.26), foi determinada a curva de variação da dureza na superfície coquilhada (HB_0) em função da espessura da coquilha (h). Essa curva está apresentada na Fig. 7.1 juntamente com os valores experimentais. Nota-se uma concordância bastante boa entre os pontos experimentais e a curva teórica, indicando que a equação desenvolvida representa bastante bem a variação de dureza observada.

Da mesma forma, utilizando-se a equação (6.37) foi determinada a curva de variação da dureza em um ponto bastante distante ($x \rightarrow \infty$) da superfície coquilhada (HB_∞) em função da espessura da coquilha. Essa curva é apresentada juntamente com os pontos experimentais também na Figura 7.1, podendo-se ainda notar uma boa concordância que confirma a validade da equação.

Utilizando-se então as equações (6.26), (6.37) e (6.47) foram determinados, respectivamente, para diferentes valores de "h" os valores das constantes (HB_0), (HB_∞) e "A". Esses valores foram introduzidos na equação (6.7) e foram determinadas as curvas de variação da dureza em função da posição "x" no bloco para cada valor de espessura de coquilha (h).

As Figuras 7.2 a 7.7 apresentam essas curvas juntamente com os pontos experimentais, respectivamente para as espessuras de coquilhas iguais a 10, 20, 30, 50, 70 e 100 mm. Pode-se observar em todos os casos que há uma concordância muito boa entre a curva teórica e os resultados experimentais, o que indica que a equação (6.7) pode ser utilizada com bastante precisão para descrever a variação de dureza ao longo dos blocos fundidos com coquilhas de diferentes espessuras.

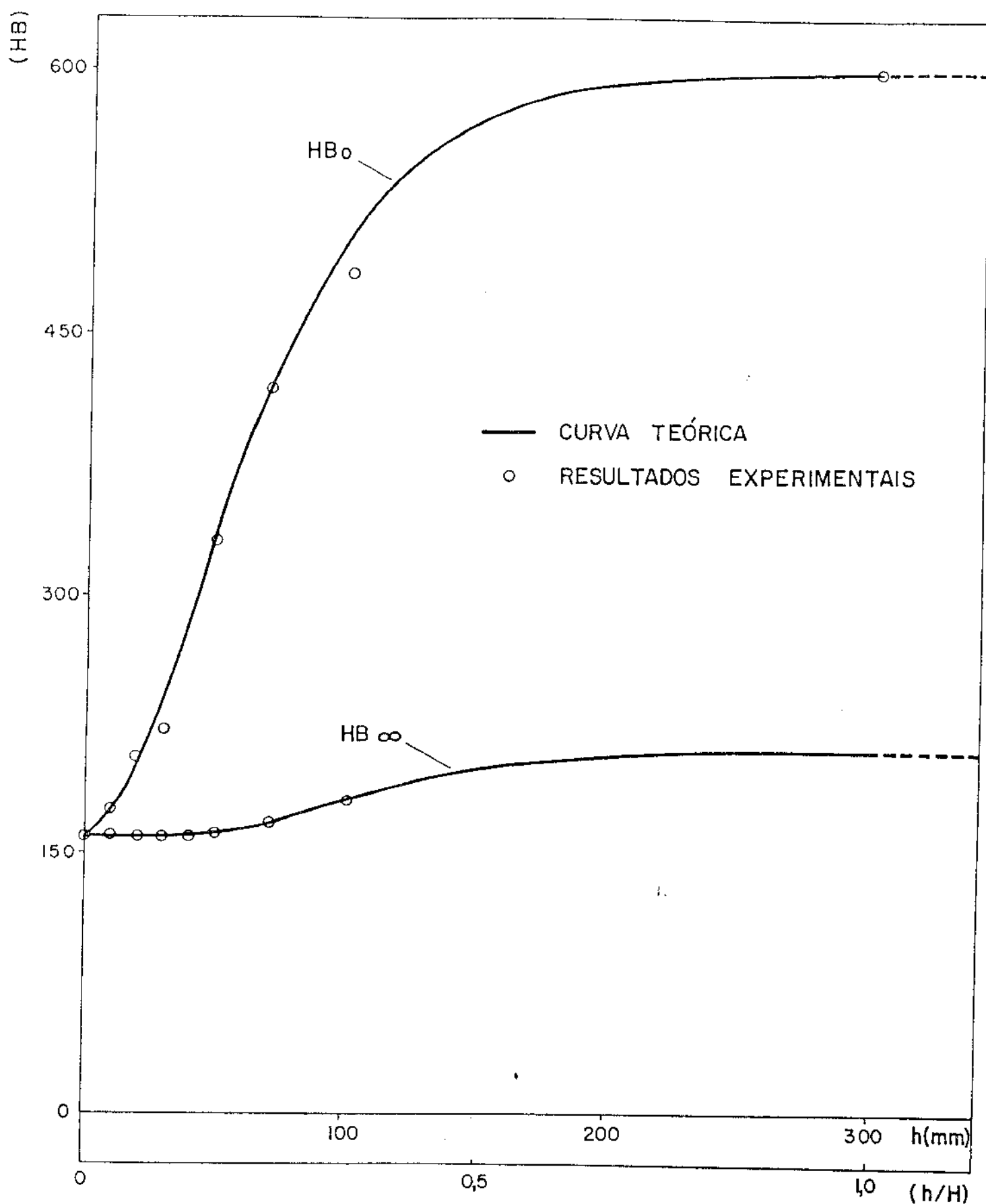


Figura 7.1 - Representação gráfica das equações (6.26) e (6.37) que fornecem respectivamente os valores da dureza na superfície coquilhada do bloco de ferro fundido nodular e em um ponto bastante afastado dessa superfície, para cada espessura de coquilha utilizada.

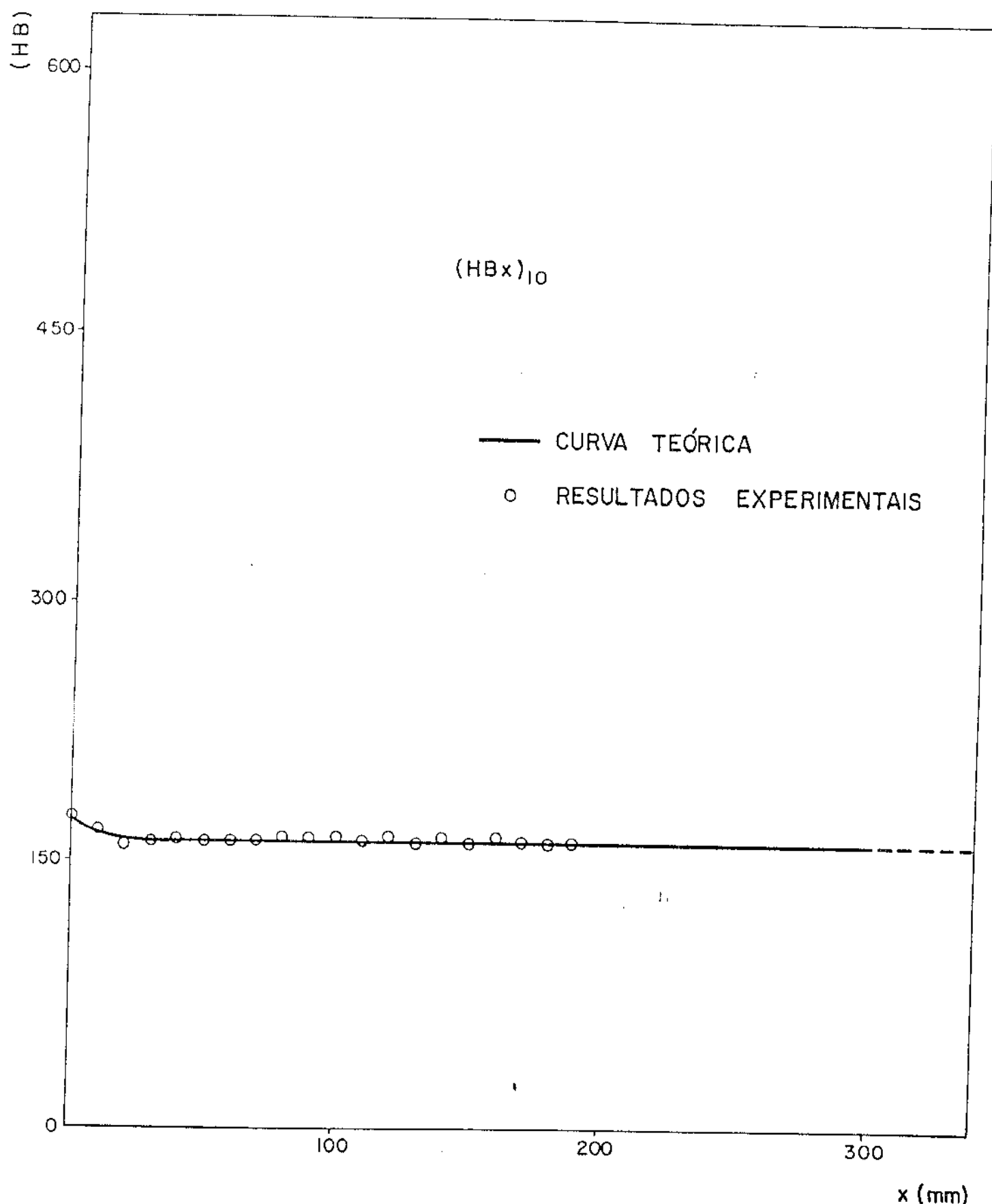


Figura 7.2 - Representação gráfica da equação (6.7) aplicada para o caso do uso de coquilha com 10 mm de espessura, juntamente com os resultados experimentais.

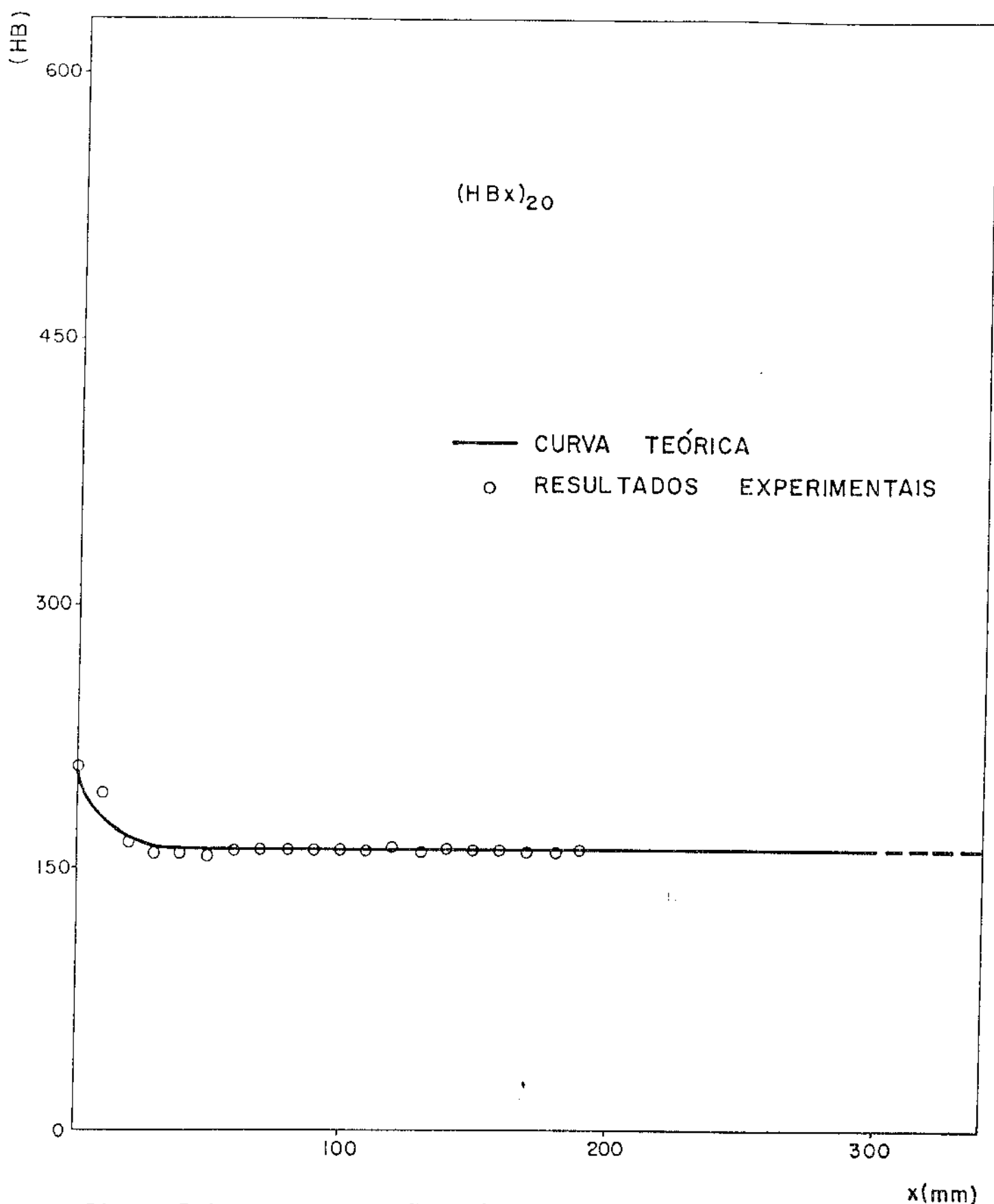


Figura 7.3 - Representação gráfica da equação (6.7) aplicada para o caso do uso de coquilha com 20 mm de espessura, juntamente com os resultados experimentais.

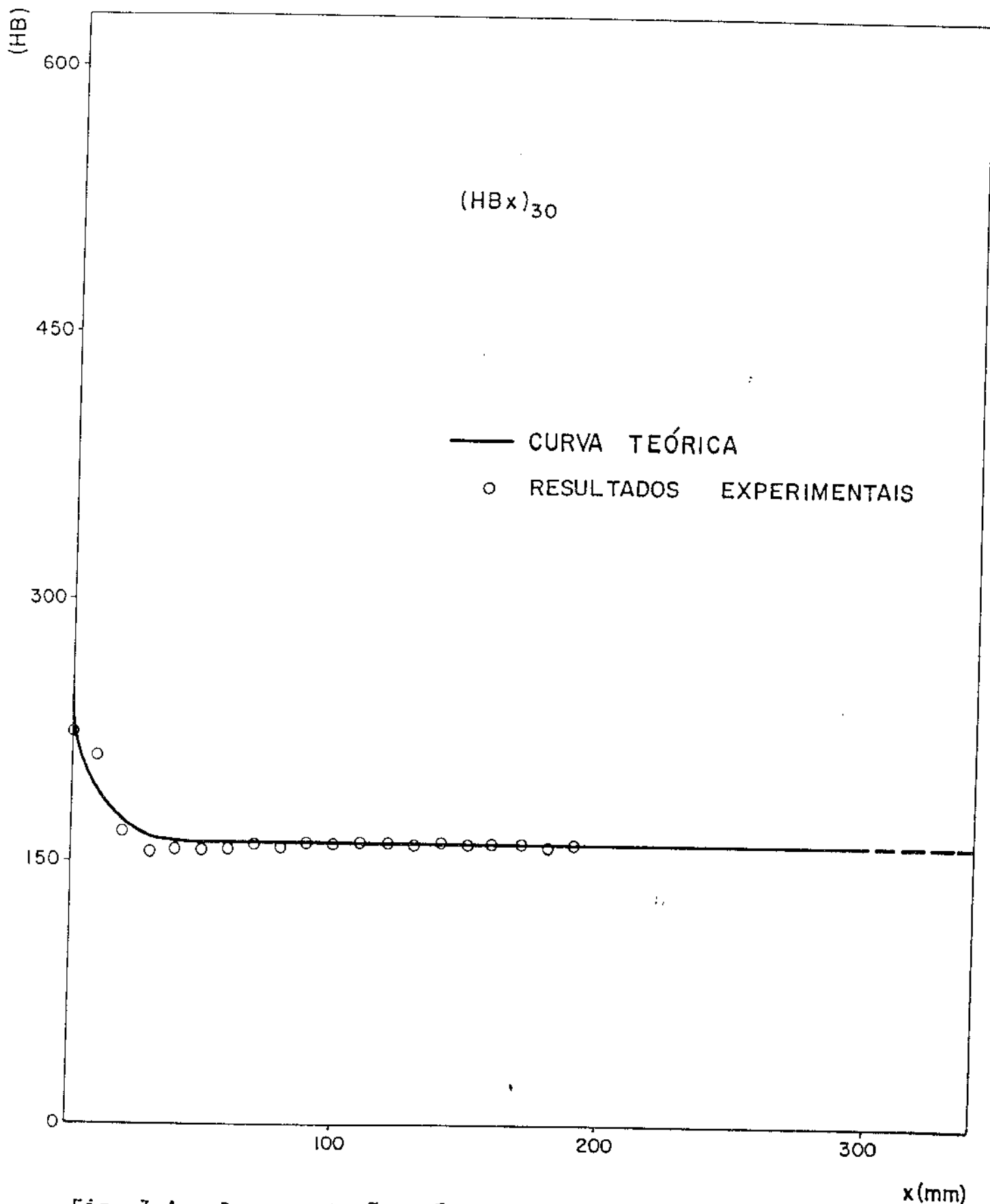


Fig. 7.4 - Representação gráfica da equação (6.7) aplicada para o caso do uso de coquilha com 30 mm de espessura, juntamente com os resultados experimentais.

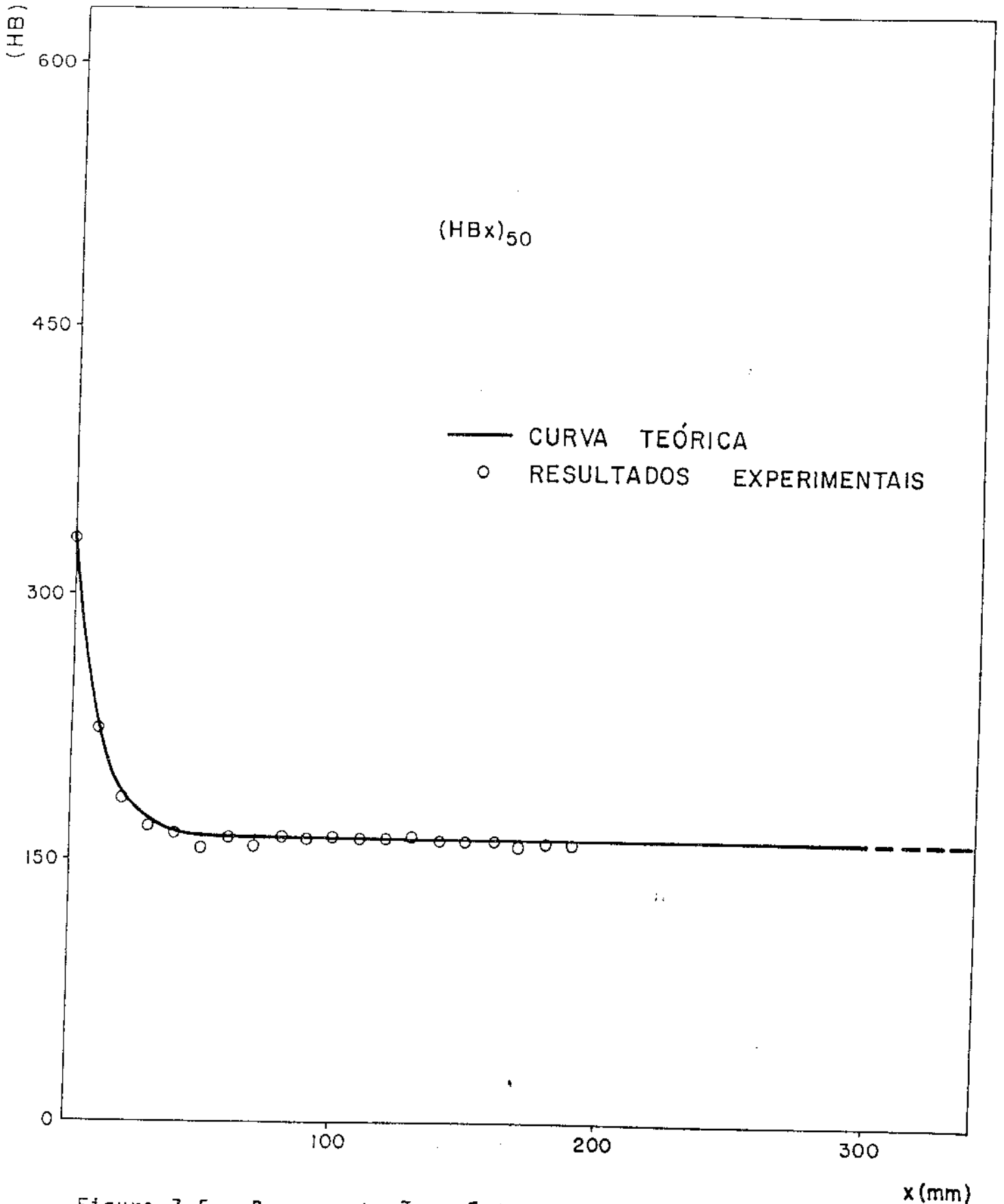


Figura 7.5 - Representação gráfica da equação (6.7) aplicada para o caso do uso de coquilha com 50 mm de espessura, juntamente com os resultados experimentais.

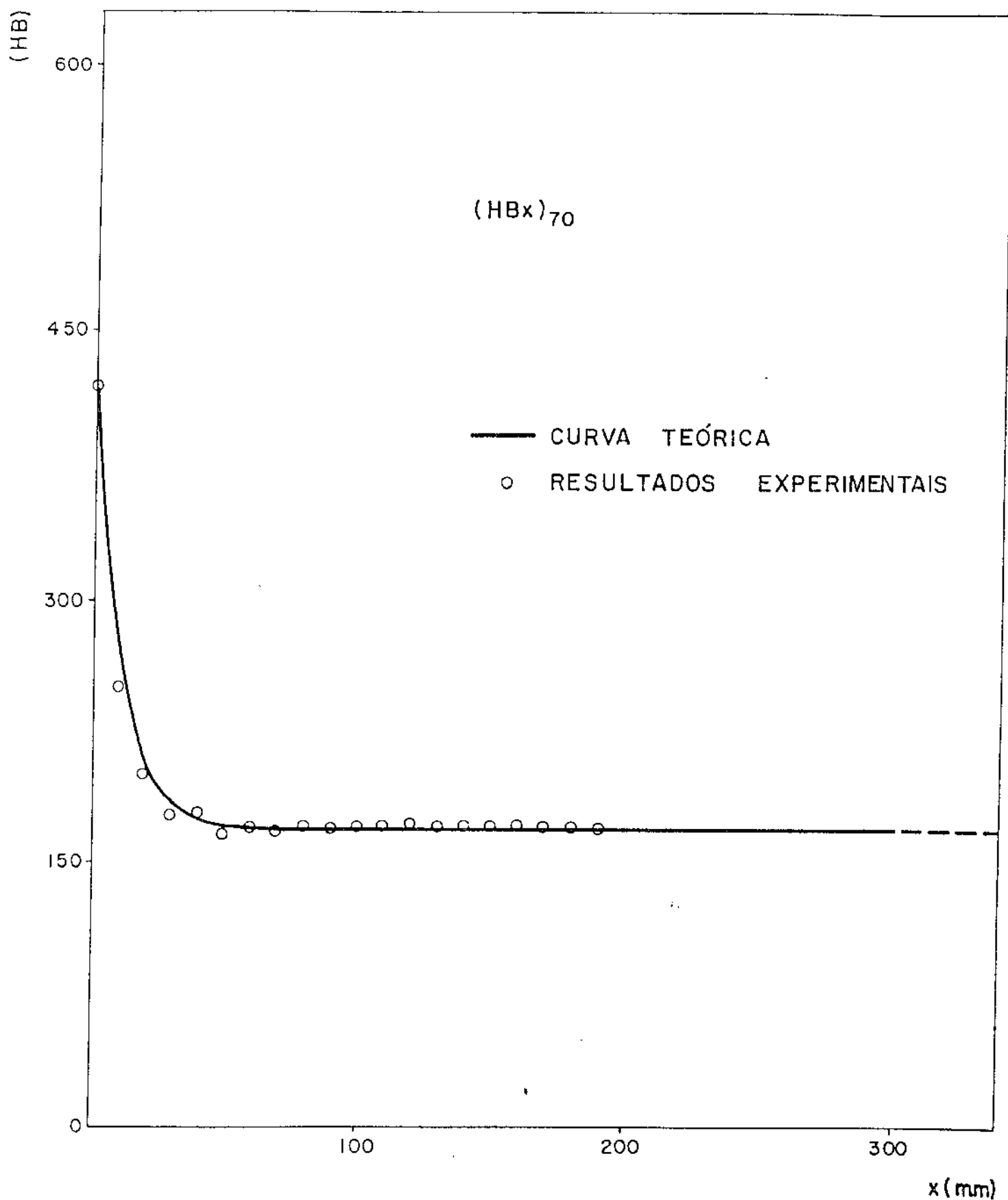


Figura 7.6 - Representação gráfica da equação (6.7) aplicada para o caso do uso de coquilha com 70 mm de espessura, juntamente com os resultados experimentais.

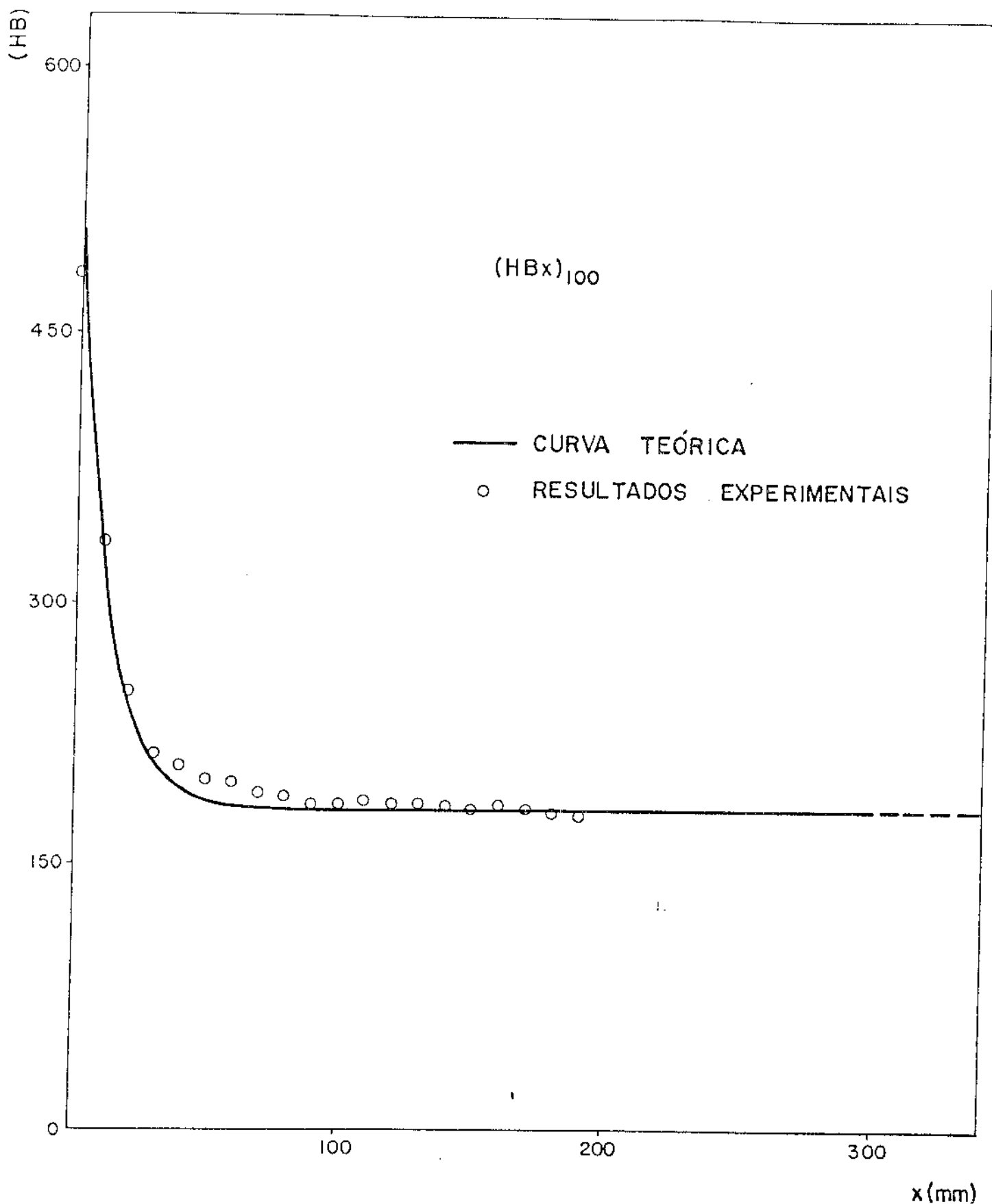


Figura 7.7 - Representação gráfica da equação (6.7) aplicada para o caso do uso de coquilha com 100 mm de espessura, juntamente com os resultados experimentais.

7.2 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

7.2.1 - Variação da Dureza (HB_0) na Superfície Coquilhada ($x=0$)

A curva teórica da Figura 7.1 indica que a dureza na superfície coquilhada apresenta um valor mínimo igual a 160 Brinell para o caso da espessura de coquilha igual a zero, ou seja, para o caso onde não se utiliza nenhuma coquilha. A medida que se aumenta a espessura da coquilha esse valor da dureza aumenta significativamente até coquilhas com espessuras em torno de 100 mm, equivalente a uma relação (h/H) igual a 0,33. A partir desse valor o aumento é menos significativo e tende para um valor constante a partir da espessura em que a coquilha possa ser considerada semi-infinita. Conforme já foi citado, segundo Sciamma (35), isso se dá quando a relação (h/H) for próxima de "1", correspondendo portanto no caso estudado a uma espessura de aproximadamente 300 mm, o que pode ser observado na curva da Figura 7.1.

Em virtude do exposto acima pode-se concluir que não há vantagem em se aumentar a espessura da coquilha após se atingir um valor de relação entre espessura da coquilha e espessura da peça igual a um. E que se obtêm influências mais significativas na dureza até valores dessa relação igual a "0,33".

7.2.2 - Variação da Dureza (HB_∞) em Pontos Muito Distantes da Superfície Coquilhada ($x+\infty$)

A variação da dureza em pontos distantes da coquilha ($x+\infty$) apresenta um comportamento semelhante ao exposto no item anterior, para superfície coquilhada, e pode ser observado também na Figura 7.1.

Como está sendo considerado que a dureza do bloco fundido sem coquilha ($h=0$) permanece constante, o valor de (HB_∞) para

"h" igual a zero é igual ao valor de (HB_0) ou seja, 160 Brinell. A medida que se aumenta a espessura da coquilha há um aumento no valor da dureza até se atingir o valor de (h/H) igual a unidade ($h=300$) quando atinge um valor constante igual a 210 Brinell.

Pode-se notar neste caso, no entanto, que a diferença entre os valores máximo e mínimo é bem menor do que o observado no caso anterior. Por outro lado, a importância maior do aumento de dureza através do coquilhamento é junto à superfície coquilhada onde há maior influência do resfriamento rápido. Quando as regiões mais distantes da superfície coquilhada solidificam-se a coquilha já está em geral saturada de calor exercendo menor influência no resfriamento, daí, a pouca influência que exerce no aumento da dureza. Do ponto de vista prático é conveniente que isso ocorra, já que é melhor que se obtenha uma peça com alta dureza na superfície e com o núcleo mais mole (dúctil).

7.2.3 - Variação da Dureza ao Longo do Bloco para Diferentes Espessuras de Coquilha

As curvas teóricas apresentadas nas Figuras 7.2 a 7.7 mostram a variação de dureza ao longo do bloco respectivamente para coquilhas de 10, 20, 30, 50, 70 e 100 mm.

Pode-se notar que para uma espessura de coquilha muito pequena, correspondendo a uma relação (h/H) igual a 0,033 ($h=10$ mm) não há efeito significativo sobre a dureza, indicando que há uma rápida saturação de calor da mesma no início do processo de solidificação reduzindo drasticamente sua eficiência.

A medida que se aumenta a espessura da coquilha seu efeito sobre a dureza tende a aumentar. Para um valor da relação (h/H) igual a 0,17 ($h=50$ mm) consegue-se dobrar o valor da dureza na superfície, em relação às peças fundidas sem coquilha, e para um valor de (h/H) igual a 0,33 ($h=100$ mm) consegue-se triplicar esse valor.

Uma visão conjunta da variação de dureza ao longo do bloco para coquilhas com diferentes espessuras (0 a 300 mm) é apre

sentada na Figura 7.8.

Uma análise dessas curvas permite observar que para espessuras de coquilha até 100 mm um aumento relativamente pequeno da espessura provoca um aumento relativamente grande na dureza, mas a partir desse valor aumentos maiores na espessura das coquilhas provocam aumentos bem menores na dureza.

A espessura de coquilha de 300 mm, correspondente a uma relação (h/H) igual a um, já caracteriza uma coquilha semi-infinita e confirmando o que já foi exposto anteriormente, qualquer aumento na espessura da coquilha a partir desse valor não provocará nenhuma alteração na dureza ao longo do bloco (ver equação 6.7). Portanto, do ponto de vista técnico não há razão para se usar espessura de coquilha maior que a correspondente à relação (h/H) igual a um. Do ponto de vista prático por outro lado não há maior interesse em se utilizar coquilhas em que essa relação seja maior que cerca de 0,33.

Pode-se notar também nas curvas da Figura 7.8 que o maior efeito da coquilha sobre a dureza dá-se até uma distância de cerca de 25 a 30 mm da superfície coquilhada, sendo que a partir daí seu efeito é sensivelmente menor em todos os casos.

A dureza no interior da peça também aumenta evidentemente com o aumento da espessura de coquilha, mas de forma bem menos efetiva que a diferença observada na superfície coquilhada, ou seja, enquanto na superfície coquilhada obtém-se um aumento de dureza de 160 até 600 Brinell quando se varia a relação (h/H) de zero a um, no interior da peça esse aumento é de apenas de 160 a 210 Brinell.

7.3 - REPRESENTAÇÃO DA VARIAÇÃO DA DUREZA SIMULTANEAMENTE COM A DISTÂNCIA AO LONGO DO BLOCO (x) E COM A ESPESSURA DA COQUILHA (h)

Um resultado interessante pode ser obtido quando se substitui as equações (6.26), (6.37) e (6.47) na equação (6.7) obtendo-se a função dureza (HB) com as variáveis independentes dis-

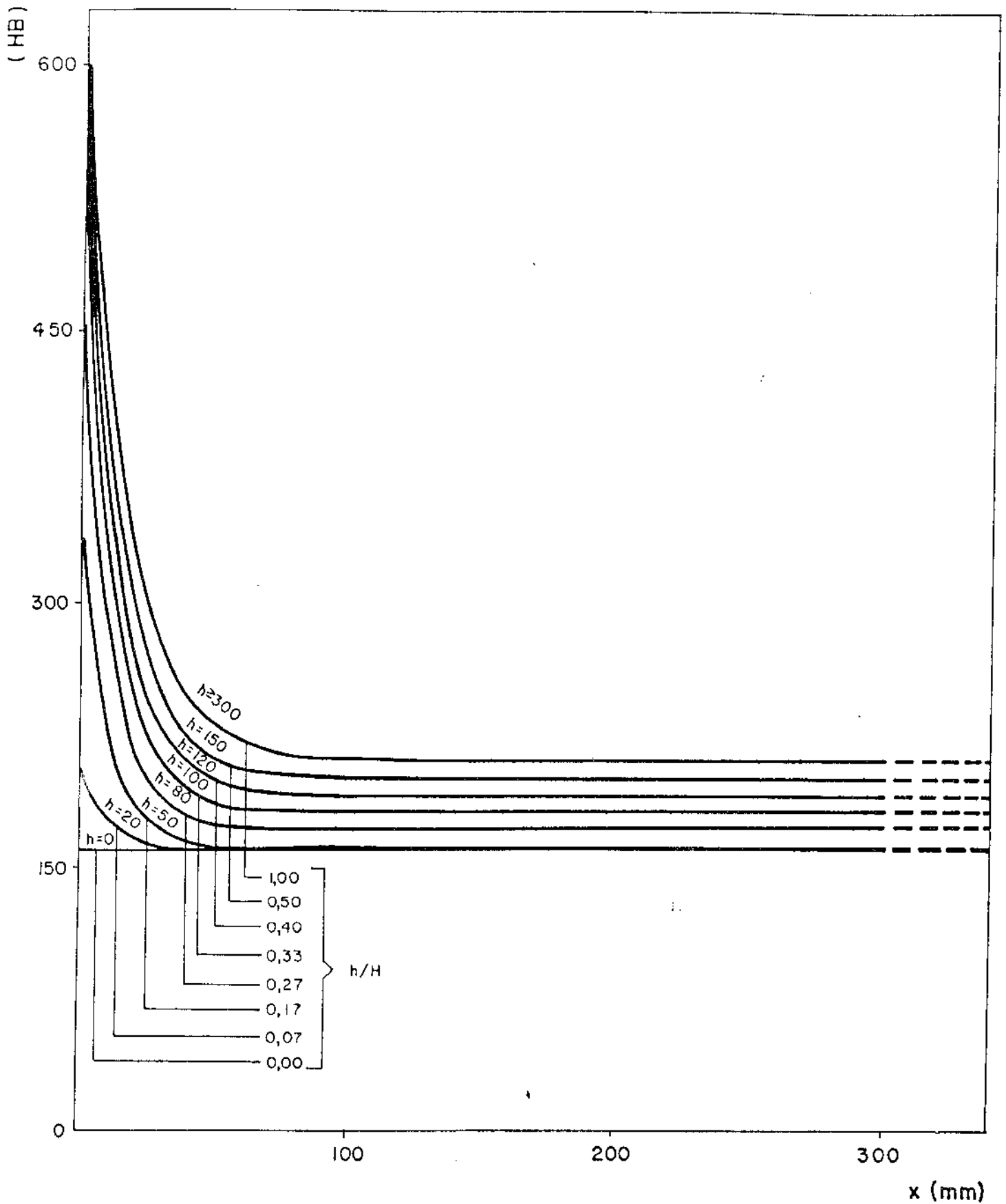


Figura 7.8 - Visão conjunta dos gráficos teóricos da variação de dureza ao longo dos blocos de ferro fundido com utilização de coquilhas de diversas espessuras (diversas relações espessura da coquilha/espessura do bloco).

tância ao longo do bloco (x) e espessura de coquilha (h):

$$\begin{aligned}
 (HB_x)_h = & (HB_0)_0 + [(HB_\infty)_\infty - (HB_0)_0] \tanh^6 \left(4 \frac{h}{H}\right) + \\
 & + \left\{ [(HB_0)_\infty - (HB_0)_0] \tanh^{1,7} \left(4 \frac{h}{H}\right) - [(HB_\infty)_\infty - (HB_0)_0] \tanh^6 \left(4 \frac{h}{H}\right) \right\} \cdot \\
 & e^{-\left[0,1 - 0,04 \tanh^6 \left(4 \frac{h}{H}\right)\right] x} \quad (7.1)
 \end{aligned}$$

Substituindo-se em (7.1) os valores das constantes $(HB_0)_0$, $(HB_\infty)_\infty$, $(HB_0)_\infty$ e o valor de "H" relativo ao caso em estudo (300 mm), obtêm-se a equação na seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 (HB_x)_h = & 160 + 50 \tanh^6 \left(\frac{4h}{300}\right) + \\
 & + \left[440 \tanh^{1,7} \left(\frac{4h}{300}\right) - 50 \tanh^6 \left(\frac{4h}{300}\right) \right] \cdot \\
 & e^{-\left[0,1 - 0,04 \tanh^6 \left(\frac{4h}{300}\right)\right] x} \quad (7.2)
 \end{aligned}$$

A equação (7.2) foi programada em um microcomputador HP 9836 acoplado a um "plotter" HP 7470 A sendo obtida uma representação tridimensional da variação da dureza em função da distância ao longo do bloco (x) e da espessura de coquilha (h), apresentada na Figura 7.9. Essa figura dá uma visão global de como a dureza ao longo do bloco varia com o aumento da espessura da coquilha através da representação de uma superfície que sintetiza os resultados comentados anteriormente.

7.4 - COMENTÁRIOS FINAIS

Mais do que desenvolver uma equação matemática para o cálculo de dureza em peças de ferro fundido nodular coquilhado, o objetivo deste trabalho foi mostrar que a variação de dureza ao

Campinas, 27 Aug 1985 - 14:33:32 Hs

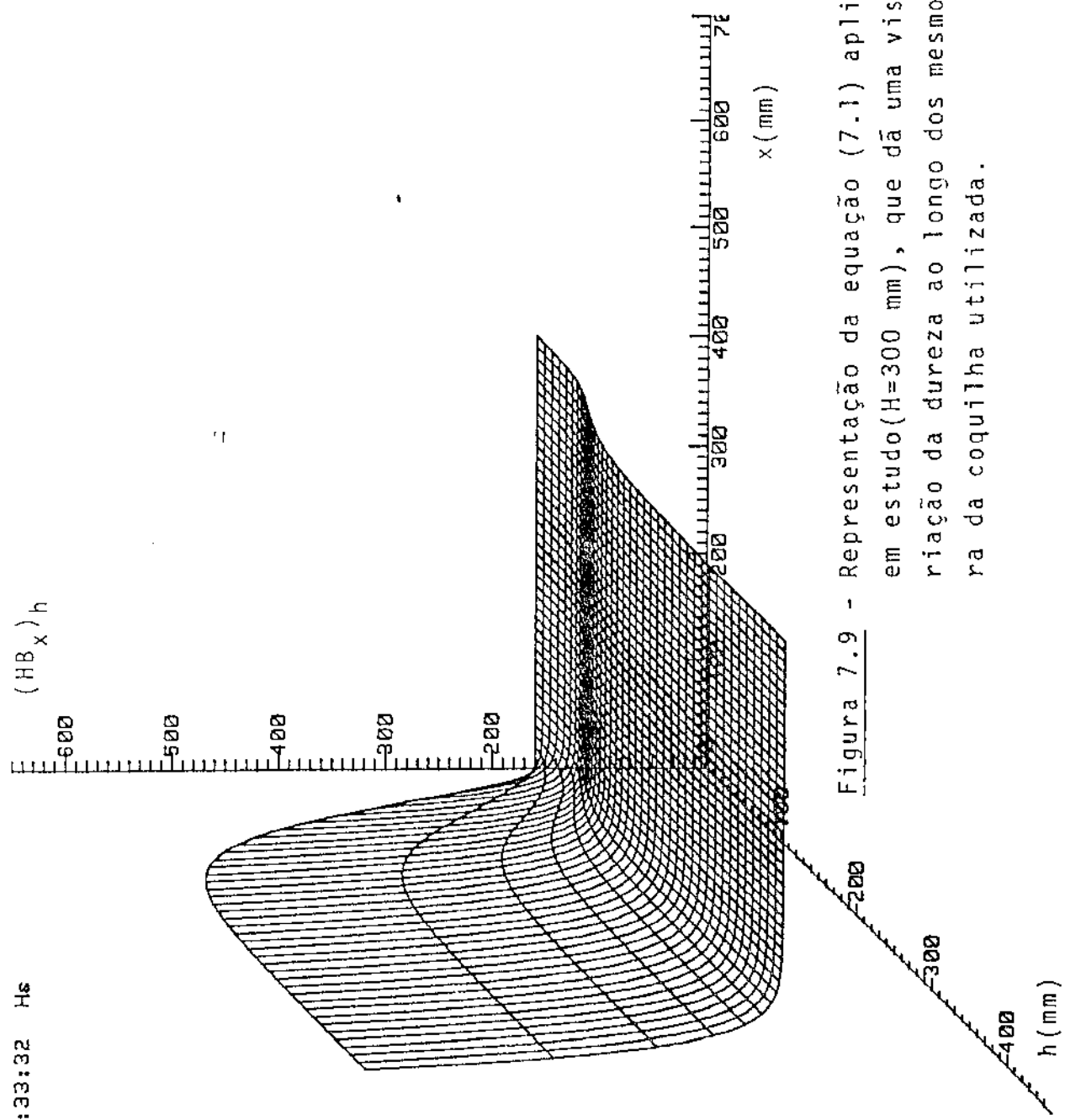


Figura 7.9 - Representação da equação (7.1) aplicada aos blocos em estudo ($H=300$ mm), que dá uma visão global da variação da dureza ao longo dos mesmos com a espessura da coquilha utilizada.

longo da peça quando se usam diferentes espessuras de coquilha, apresentam um comportamento bastante característico que pode ser colocado em termos de funções matemáticas conhecidas, resultando em equações que podem ser utilizadas para uma análise que auxilie o dimensionamento de coquilhas.

Em geral, as condições de contorno foram obtidas através da experiência e os expoentes das equações foram obtidos através de equacionamento matemático e condições de contorno características do caso estudado, associados a uma análise experimental. De qualquer forma, os valores obtidos foram testados extensivamente e comparados com os resultados experimentais obtidos para a variação da dureza tanto em função da distância ao longo do bloco mantendo-se a espessura de coquilha constante, quanto em função da espessura de coquilha mantendo-se a distância ao longo do bloco constante. Os resultados apresentados foram os que melhor satisfizeram essas condições, podendo-se ter uma segurança bastante boa quanto à sua precisão.

Evidentemente a variação de dureza ao longo do bloco em função da espessura de coquilha está associada às mudanças estruturais provocadas tanto nos nódulos de grafita como na matriz com a utilização das coquilhas. Assim, um trabalho interessante para complementar este trabalho, seria um estudo conjunto das estruturas ao longo do bloco quando se usam diferentes espessuras de coquilha e associar os resultados aos obtidos neste trabalho.

Neste trabalho foi analisado um tipo de ferro fundido nodular bastante utilizado na prática e que apresenta boas respostas ao coquilhamento. Uma outra sugestão para trabalhos complementares seria então analisar outros tipos de ferros fundidos para verificar como se comportariam suas curvas de variação de dureza.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem que sejam extraídas as conclusões citadas a seguir, válidas para o material e as condições adotadas neste trabalho.

A dureza ao longo do bloco tem seu valor máximo na superfície coquilhada e decresce exponencialmente à medida que se afasta desta superfície, tendendo a um valor constante.

As durezas acima referidas são tanto maiores quanto mais espessas as coquilhas utilizadas, até um certo valor de espessura a partir do qual não se observa mais aumento nas durezas.

No entanto, mais importante do que a espessura de coquilha utilizada é a relação entre a espessura de coquilha e a espassura do bloco (peça). Quando essa relação atinge um valor aproximadamente igual a um, a coquilha torna-se semi-infinita e qualquer aumento na espessura da mesma é inútil.

As curvas de variação de dureza ao longo de blocos, fundidos com diferentes espessuras de coquilha, são semelhantes e podem ser representadas por funções matemáticas conhecidas (equação 6.7).

A influência das coquilhas sobre a variação de dureza ao longo dos blocos é bastante mais sensível nos primeiros 25 a 30 mm a partir da superfície coquilhada.

A dureza na superfície coquilhada de cada bloco aumenta com a espessura da coquilha utilizada até atingir um valor constante. Essa variação de dureza também pode ser representada por funções matemáticas conhecidas (equação 6.26).

A dureza na superfície coquilhada é pouco aumentada com o uso de coquilhas com espessuras relativamente muito pequenas devido à rápida saturação de calor na mesma. Porém, para relação espessura de coquilha/espessura da peça igual a 0,17 o va-

lor da dureza dobra em relação a uma peça fundida sem o uso da coquilha e para a relação igual a 0,33 o valor da dureza triplica. A partir desse valor o aumento é menos significativo e tende para um valor constante quando essa relação aproxima-se de um. Portanto, do ponto de vista prático não há interesse em ultrapassar a relação citada igual a 0,33.

A dureza em uma distância bastante afastada da superfície coquilhada de cada bloco, aumenta com a espessura da coquilha utilizada, até um certo valor que permanece constante. Esse aumento é muito menor do que aquele observado para as superfícies coquilhadas uma vez que quando as regiões bastante afastadas começam a solidificar-se as coquilhas já estão relativamente saturadas de calor.

Essa variação de dureza da região bastante afastada da superfície coquilhada de cada bloco, também pode ser representada por funções matemáticas conhecidas (equação 6.37).

Com as três equações citadas obtém-se uma outra equação (equação 7.1) que dá a dureza em qualquer posição do bloco (peça) para qualquer relação espessura de coquilha/espessura da peça, para o ferro fundido nodular utilizado neste trabalho.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 - WEINBEIRG, F. - The Casting of Steel. Metallurgical Transactions A, v. 6, p.1971-1985, novembro, 1975.
- 02 - SIMPSON, B.L. - History of the Metal Casting Industry.
2 ed. Chicago, Ed. American Foundrymen's Society, 1969,
p. 1-20.
- 03 - KARSAY, S.I. - Ductile Iron - Production Practices. 1 ed.
USA, Ed. American Foundrymen's Society, 1975.
- 04 - SCHRADER, A. e HANEMANN, H. - Atlas Metallographicus.
Berlin, Ed. Borntraeger, 1933, p. 53.
- 05 - Produção e Destino dos Fundidos. Fundição, nº 6, p. 6-15,
abril, 1979.
- 06 - KARSAY, S.I. - Ductile Iron I e II - Engineering Design,
Properties, Applications, Canadá, Ed. Quebec Iron and Ti-
tanium Corporation, 1971.
- 07 - PRATES, M. e DAVIES, G.J. - Solidificação e Fundição de
Metais e suas Ligas. 1 ed. São Paulo, Ed. Universidade
de São Paulo/LTC, 1978, p. 74 e 75.

- 08 - KONDIC, V. - Princípios Metalúrgicos de Fundição. 1 ed.
São Paulo, Ed. Universidade de São Paulo/Ed. Polígono,
1973.
- 09 - HAHN, B. - Fundição de Ligas Ferrosas em Coquilha. Fundi-
ção, nº 25, p. 19-22, novembro, 1980.
- 10 - RASSENFOSS, J.A. - Mold Materials for Ferrous Castings.
AFS International Cast Metals Journal, p. 48-61, dezem-
bro, 1977.
- 11 - ANGUS, H.T. - Cast Iron: Physical and Engineering Properties,
2 ed., London, Ed. Butterworth, 1976.
- 12 - CHIAVERINI, V. - Aços e Ferros Fundidos, 4 ed., São Paulo,
Ed. ABM, 1979, p. 442.
- 13 - SANTOS, A.B.S. e BRANCO, C.H.C. - Metalurgia dos Ferros
Fundidos Cinzentos e Nodulares, 1 ed., São Paulo, Ed.
IPT, 1977.
- 14 - PIESKE, A. et alii - Ferros Fundidos Cinzentos de Alta
Qualidade, 1 ed., Joinville, Ed. Sociedade Educacional
Tupy, 1974.
- 15 - LAKHTIN, Y. - Engineering Physical Metallurgy, 2 ed.,
Moscou, Ed. MIR.

- 16 - BARTON, R. - Recent Developments in the Production of Nodular Iron. The British Foundryman, v. 70, p. 153-167, junho, 1977.
- 17 - SANTOS, A.B.S. et alii - Efeito de Algumas Variáveis de Processo na Estrutura e Propriedades de Ferro Fundido Nodular. Metalurgia, v. 30, nº 201, p. 567-577, agosto, 1974.
- 18 - SINATORA, A. e SANTOS, A.B.S. - Efeito da Porcentagem de Fe-Si Utilizado como Inoculante na Estrutura e Propriedades de Ferro Nodular. Metalurgia, v. 32, p. 225-263, abril, 1976.
- 19 - Norma Técnica da ABNT - NBR 6916 - Ferro Fundido Nodular ou Ferro Fundido com Grafita Esferoidal. outubro, 1981.
- 20 - Norma Técnica da ABNT - NBR 6593 - Morfologia da Grafita em Ferro Fundido. abril, 1981.
- 21 - Norma Técnica da ABNT - NBR 6913 - Ferros Fundidos Nodulares e Maleáveis Contagem de Nódulos de Grafita. outubro, 1981.
- 22 - REESMAN, R.W. e LOPER JR., C.R. - Heavy Section Ductile Iron as Affected by Certain Processing Variables. Modern Casting, v. 51, p. 73-81, março, 1967.

- 23 - LOPER JR., C.R. - Processing and Control of Ductile Cast Iron. Modern Casting, v. 55, p. 1, janeiro, 1969.
- 24 - KUST, R.R. e LOPER JR., C.R. - The Production of Heavy Section Ductile Iron. AFS Transactions, v. 76, p.540-546, 1968.
- 25 - WITHEY, D.H. e LOPER JR., C.R. - Effect of the Use of Chills in Heavy Section Ductile Iron Castings. AFS Transactions, v. 77, p. 262-280, 1969.
- 26 - HEBBERT, R.A. - Holding Nodular Iron in Channel Induction Furnaces. Metals and Materials, p. 39-41, outubro, 1977.
- 27 - SANTOS, A.B.S. e ALBERTIN, E. - Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Ferro Fundido Nodular Esfriado com Baixa Velocidade. Metalurgia - ABM, v. 33, p. 85-92, fevereiro, 1977.
- 28 - ALBERTIN, E. et alii - Flutuação de Grafita em Ferros Fundidos Nodulares. Publicação nº 1098. IPT, 1977.
- 29 - SANTOS, M.A. - A Influência da Extração de Calor na Micro e Macroestrutura de Ferro Fundido Nodular. Tese de Mestrado - Publicação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1976.

- 30 - SANTOS, M.A. e MÜLLER, A. - Velocidade de Extração de Calor sobre as Macro e Microestruturas de um Ferro Fundido Nodular Quase Eutético. Metalurgia-ABM, v. 34, p.699-705, outubro, 1978.
- 31 - SANTOS, A.B.S. e ALBERTIN, E. - Defeitos em Peças de Seção Espessa de Ferro Fundido Nodular. Fundição, nº 7, p.25-30, maio, 1979.
- 32 - WATMOUGH, T. e HIEBER, A.F. - Solidification and Cooling Rate Related to Hardness and Structure in Ductile Iron Castings. AFS Transactions, v. 88, p. 353-362, 1980.
- 33 - MOTZ, J.M. - Fracture Mechanical Properties in Heavy Sections of Nodular Iron Castings. Giesserei, nº 67, v. 20, p.628-637, setembro, 1980.
- 34 - PALMER, K.B. - Effect of Cast Section Size on Fatigue Properties and the Prevention of Corrosion Fatigue of Nodular Irons. The British Foundryman nº 11, v. 75, p. 201-212, novembro, 1982.
- 35 - SCIAMA, G. - Épaisseurs des Moules et Vitesses de Refroidissement des Pièces Moulées. Fonderie, nº 344, p.143-151, abril, 1975.
- 36 - Norma Técnica da ASTM - E 10 - Standard Method of Test for Brinell Hardness of Metallic Materials. 1973.
- 37 - Norma Técnica da ABNT - NBR 6394 - Determinação da Dureza Brinell de Materiais Metálicos. dezembro, 1980.

APÊNDICESIMBOLOGIA

- A - constante da equação (6.3)
 B₁ - constante da equação (6.3)
 B₂ - constante da equação (6.3)
 C₁ - constante da equação (6.11)
 C₂ - constante da equação (6.11)
 D₁ - constante da equação (6.11)
 D₂ - constante da equação (6.11)
 e - base dos logarítmos Neperianos
 E₁ - constante da equação (6.27)
 E₂ - constante da equação (6.27)
 F₁ - constante da equação (6.27)
 F₂ - constante da equação (6.27)
 h - espessura da coquilha
 H - espessura do bloco (peça) de ferro fundido
 HB - dureza Brinell
 (HB_x)_h - dureza Brinell a distância "x" da superfície coquilha da em um bloco de ferro fundido com coquilha de espessura "h"
 (HB₀)₀ - dureza Brinell da superfície em contato com a areia de um bloco de ferro fundido sem coquilha
 (HB₀)_∞ - dureza Brinell da superfície coquilhada de um ferro fundido com coquilha semi-infinita
 (HB_∞)_h - dureza Brinell em uma posição relativamente afastada da superfície coquilhada de um bloco de ferro-fundido com coquilha de espessura "h"
 (HB₀)_h - dureza Brinell na superfície coquilhada de um bloco de ferro fundido com coquilha de espessura "h"
 (HB_∞)₀ - dureza Brinell em uma posição relativamente afastada da superfície em contato com a areia de um bloco de ferro fundido sem o uso de coquilha (h=0)

$(HB_{\infty})_{\infty}$ - dureza Brinell em uma posição bastante afastada da superfície coquilhada de um bloco de ferro fundido com coquilha semi-infinita

x - distância ao longo do bloco de ferro fundido a partir da superfície coquilhada

y - expoente da função tanh

z - variável independente da função tanh $(z = D_2 \frac{h}{H})$