

unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

CAMILLA GANDINE GONÇALVES

ANÁLISE DE VARIÁVEIS DINÂMICAS NA FUNDIÇÃO
CENTRIFUGADA DE CILINDROS DE LAMINAÇÃO

Guaratinguetá
2011

CAMILLA GANDINE GONÇALVES

ANÁLISE DE VARIÁVEIS DINÂMICAS NA FUNDIÇÃO
CENTRIFUGADA DE CILINDROS DE LAMINAÇÃO

Dissertação apresentada à Faculdade
de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá, Universidade
Estadual Paulista, para a obtenção
do título de Mestre em Engenharia
Mecânica na área de Projetos.

Orientador: Prof. Dr. José Geraldo Trani Brandão

Guaratinguetá
2011


G635a	<p>Gonçalves, Camilla Gandine Análise de variáveis dinâmicas na fundição centrifugada de cilindros de laminação/ Camilla Gandine Gonçalves – Guaratinguetá : [s.n], 2011. 70 f : il. Bibliografia: f. 67-70</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Orientador: Prof. Dr. José Geraldo Trani Brandão</p> <p>1. Fundição 2. Laminação (Metalurgia) 3. Cilindros - fundição I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.74 (043)</p>
-------	--

CAMILLA GANDINE GONÇALVES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”


PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: PROJETOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador

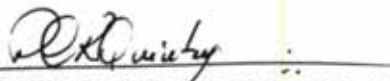
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. JOSÉ GERALDO TRANI BRANDÃO
Orientador / Unesp-Feg



Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA
Unesp-Feg



Prof. Dr. PAULO CESAR RIBEIRO QUINTAIROS
UNITAU

DADOS CURRICULARES

CAMILLA GANDINE GONÇALVES

NASCIMENTO	07.07.1984 – SÃO BERNARDO DO CAMPO / SP
FILIAÇÃO	João Batista Nascimento Gonçalves Malta Vieira Gandine Gonçalves
1999/2001	Curso Técnico Profissionalizante Curso Técnico Profissionalizante em Mecânica, no Colégio Técnico Industrial do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
2002/2009	Curso de Graduação Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
2009/2011	Curso de Pós-Graduação Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

Eu dedico esse trabalho aos meus pais, aos meus irmãos e ao
meu esposo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, Rei dos Reis, Senhor dos Senhores e Mestre dos Mestres.

Agradeço a minha família:

aos meus pais, *João Batista e Marta*

aos meus irmãos, *Guilherme e Murillo*, e à minha cunhada, *Simone*

por serem constantes, companheiros, amigos e irmãos.

Agradeço especialmente ao meu esposo, *Rauli Batista*, por continuar a ser meu melhor amigo, companheiro e amante.

Agradeço ao meu cunhado, *Rauber Batista*, aos meus sogros, *João Batista e Vilma*.

Agradeço aos meus amigos de infância, raros e preciosos, para os quais nem mesmo o tempo conseguiu desbotar o amor fraternal, o meu respeito e a minha admiração. Alguns já se foram, mas até hoje permanece a lembrança do brilho divino de seus olhares.

Agradeço à UNESP e ao Departamento de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, pela minha formação pessoal, profissional e acadêmica,

ao meu orientador, professor *José Geraldo Trani Brandão*, pelo encorajamento, pela confiança em mim depositada e pela paciência;

aos servidores do campus e às bibliotecárias, pela inestimável ajuda.

Agradeço aos meus colegas de trabalho, especialmente àqueles que não me deixam esquecer que estamos todos no mesmo barco.

Agradeço à empresa que forneceu todos os dados para elaboração desse trabalho e aos seus funcionários.

“Quando eu era menino,
falava como menino,
sentia como menino,
discorria como menino,
mas, logo que cheguei a ser homem,
acabei com as coisas de menino.”

I Aos Coríntios 13, 12

GONÇALVES, C.G. **Análise de variáveis dinâmicas na fundição centrífuga de cilindros de laminação**. 2011. 70 f. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

Este estudo mostra as variáveis dinâmicas do processo de fundição centrífuga de cilindros de laminação, que são utilizados para realização de conformação em gaiolas de laminação. O objetivo desse estudo é analisar as principais variáveis dinâmicas do processo de fundição centrífuga de cilindros de laminação e estudar as relações entre estas variáveis. Os processos de fundição centrífuga podem ser classificados em fundição centrífuga vertical e horizontal. Para a fundição centrífuga vertical, são elaborados os envelope de carga de dois modelos de máquinas centrífugas verticais existentes na literatura, onde se consegue determinar o tipo de rolamento de apoio utilizado na máquina. Para a fundição centrífuga horizontal, são estudadas variáveis como rotação, razão G, “*aspect ratio*”, espessura e vibração de uma amostra de aproximadamente 1.000 cilindros de ferro fundido, aço rápido e aço alto cromo. Desta amostra, verifica-se que a causa de sucateamento de parte dos cilindros não está ligada a adoção de variáveis dinâmicas incorretas no processo. Também é visto que diferentemente do alumínio, os cilindros de ferro fundido, aço rápido e aço alto cromo exigem maior rotação quanto maior a espessura da casca fundida.

PALAVRAS-CHAVE: Fundição, Laminação, Cilindros.

GONÇALVES, C.G. **Dynamic variable analysis of centrifugal casting process of rolling mill rolls.** 2011. 70 s. Master's Thesis (Master's Degree in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

This paper shows the dynamic variable of centrifugal casting process of rolling mill rolls which are used to compress the metal in rolling mill process. The main goal is to analyze the main dynamic variable and to study its relation in the process. There are two type of centrifugal casting: horizontal and vertical. For the horizontal centrifugal casting, two load envelopes are done, being possible to determine the bearing model used on the vertical centrifugal casting machine. For the horizontal centrifugal casting, variable such as rotating, ratio G, aspect ratio, thickness and vibration are studied to a sample of 1,000 casting rolls made of casting iron, high speed steel and high chromium steel. From this sample, it is seen that the cause of scrapping is not related to incorrect adoption of dynamic variables in the process. It is also verified that differently from the aluminum, cast iron, high speed steel and high chrome steel rolls demand greater speed with the increasing the shell casting thickness.

KEYWORDS: Centrifugal casting, Rolling mill, Rolling mill rolls.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Típica gaiola de laminação.....	19
Figura 2	- Sequência de laminação de barras, perfis e produtos provenientes de blocos, tarugos e placas.....	20
Figura 3	- Arranjos típicos de laminadores.....	21
Figura 4	- Desenho ilustrativo de um cilindro de laminação.....	23
Figura 5	- Desenho esquemático de um processo de fundição centrífuga.....	29
Figura 6	- Esquema de um projeto de máquina centrífuga horizontal.....	34
Figura 7	- Instalação típica de uma máquina centrífuga vertical.....	35
Figura 8	- Ciclo de rotação típico de uma máquina centrífuga horizontal.....	36
Figura 9	- Exemplo de um envelope de carga.....	40
Figura 10	- Rotação do recipiente fundido <i>versus</i> dureza da superfície.....	42
Figura 11	- Rotação de formação <i>versus</i> espessura para três materiais.....	44
Figura 12	- Casca de alumínio fundida com 4 mm de espessura a diversas rotações.....	44
Figura 13	- Casca de alumínio fundida com 6 mm de espessura a diversas rotações.....	44
Figura 14	- Exemplo de instabilidade elíptica, indicando ressonância no primeiro modo normal de vibração.....	47
Figura 15	- Envelope de carga para máquina centrífuga vertical modelo AS.....	50
Figura 16	- Envelope de carga para máquina centrífuga vertical modelo VS.....	50
Figura 17	- Faixas de rotação <i>versus</i> peso dos cilindros da amostra boa, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.....	52
Figura 18	- Faixas de rotação <i>versus</i> peso dos cilindros da amostra sucateada, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.....	53
Figura 19	- Faixas de razão G <i>versus</i> peso dos cilindros da amostra boa, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.....	53
Figura 20	- Faixas de razão G <i>versus</i> peso dos cilindros da amostra sucateada, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.....	54
Figura 21	- Rotação da casca <i>versus</i> diâmetro da casca dos cilindros da amostra boa, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.....	55
Figura 22	- Rotação da casca <i>versus</i> diâmetro da casca dos cilindros da amostra sucateada, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.....	56
Figura 23	- “Aspect Ratio” L/D <i>versus</i> rotação dos cilindros da amostra boa, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.....	57
Figura 24	- “Aspect Ratio” L/D <i>versus</i> rotação dos cilindros da amostra sucateada, para aço rápido, alto cromo e ferro fundido nodular.....	57
Figura 25	- Espessura da casca <i>versus</i> rotação dos cilindros da amostra boa, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.....	58
Figura 26	- Espessura da casca <i>versus</i> rotação dos cilindros da amostra sucateada, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.....	59

Figura 27	- Efeito do diâmetro na rotação de formação do cilindro, para amostras de alumínio de mesmo comprimento.....	59
Figura 28	- Efeito do diâmetro na rotação de formação do cilindro, para amostras de ferro fundido nodular de mesmo comprimento.....	60
Figura 29	- Formação do cilindro de alumínio de diâmetro 81 mm para diferentes comprimentos.....	61
Figura 30	- Formação do cilindro de ferro fundido nodular de diâmetro 725 mm para diferentes comprimentos.....	61
Figura 31	- Picos de vibração no mancal 1 <i>versus</i> mancal 2 dos cilindros da amostra boa, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.....	62
Figura 32	- Picos de vibração no mancal 1 <i>versus</i> mancal 2 dos cilindros da amostra sucateada, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Rotação e pesos admissíveis para dois modelos de máquina de fundição centrífuga vertical.....	49
----------	---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	- Aplicações de cilindros de ferro fundido.....	25
Quadro 2	- Aplicações de cilindros de aço fundido.....	26
Quadro 3	- Cilindros fundidos por Villares Rolls.....	27
Quadro 4	- Dimensões e pesos da amostra de cilindros.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ASM - *American Society for Metals*
- AC - Corrente alternada
- %C - Percentual de carbono
- DC - Corrente continua
- HSc - Dureza Shore C
- RPM - Rotação por minuto

LISTA DE SÍMBOLOS

a_n	aceleração normal	$[m/s^2]$
C	capacidade de carga dos rolamentos	$[N]$
D	diâmetro	$[m]$
$\Delta\Omega$	variação da velocidade angular	$[rad/s]$
ε	número de Rossby	$[1]$
E	número de Ekman	$[1]$
F_c	força centrífuga	$[N]$
F_g	força gravitacional	$[N]$
F_z	esforço dinâmico na direção z	$[N]$
G	razão entre força centrífuga e força gravitacional	$[1]$
g	aceleração da gravidade	$[m/s^2]$
H	altura do recipiente cilíndrico	$[m]$
L	vida dos rolamentos	$[min]$
L/D	<i>aspect ratio</i>	$[1]$
m	massa	$[kg]$
N	rotação	$[rpm]$
P	esforço dinâmico na direção z	$[N]$
p	constante do fabricante para rolamento	$[1]$
P_c	peso da centrífuga	$[N]$
P_m	peso do metal	$[N]$
r	raio	$[m]$
v	velocidade linear	$[m/s]$
ν	viscosidade cinemática	$[m^2/s]$
Ω	velocidade angular	$[rad/s]$

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivo	18
1.2 Justificativa	18
1.3 Estrutura do trabalho	22
2 EQUIPAMENTOS E PROCESSOS.....	23
2.1 Produtos.....	23
2.1.1 Materiais e aplicação dos cilindros de ferro fundido	24
2.1.2 Materiais e aplicação dos cilindros de aço fundido	26
2.1.3 Cilindros fundidos de fabricante brasileiro	27
2.2 Processos de fundição centrífuga	28
2.2.1 Fundição centrífuga horizontal	29
2.2.2 Fundição centrífuga vertical.....	30
2.2.3 Vantagens da fundição centrífuga	31
2.2.4 Defeitos na fundição centrífuga.....	32
2.3 Tipos de máquinas centrífugas.....	33
2.3.1 Máquina centrífuga horizontal	33
2.3.2 Máquina centrífuga vertical	34
3 ESTUDO DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO	36
3.1 Rotação e aceleração	36
3.2 Forças e momentos	39
3.3 Trajetória do metal líquido.....	41
3.4 Estabilidade em centrifugação	45
4 ESTUDO DE CASO	48
4.1 Análise de forças e momentos.....	49
4.2 Análise da rotação e aceleração.....	51
4.3 Análise da trajetória do metal	55

4.4 Análise da instabilidade na centrifugação.....	62
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	64
6 CONCLUSÃO.....	66
REFERÊNCIAS	67
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	70

1 INTRODUÇÃO

Largamente utilizado na fabricação de metais, a laminação é talvez o mais importante processo de conformação dos metais. Mais de 90% de todo o aço, alumínio e cobre produzido mundialmente passam pelo processo de laminação pelo menos por uma vez. Produtos laminados representam uma parcela significativa na produção de metais e podem ser encontrados em vários setores.

Todo laminador leva ao menos dois cilindros de laminação, que são os ferramentais responsáveis pelo contato direto com o material a ser laminado.

O processo de fundição centrífuga para fabricação de cilindros de laminação apresenta melhores propriedades mecânicas no produto final, em relação à fundição estática.

Entender o funcionamento das variáveis mecânicas básicas envolvidas na fundição centrífuga e a relação entre elas pode propiciar avanço no domínio deste processo e de sua tecnologia.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é analisar as principais variáveis dinâmicas do processo de fundição centrífuga de cilindros de laminação e estudar as relações entre estas variáveis, para ampliar as bases teóricas existentes sobre o processo através do conhecimento do comportamento destas variáveis para a fabricação de cilindros de laminação.

1.2 Justificativa

Os processos de conformação mecânica são processos que alteram a seção dos materiais, através da deformação plástica obtida pela aplicação de força. Dentre esses processos destacam-se: forjamento, laminação, trefilação, extrusão e estampagem. Estes processos podem ser realizados a quente ou a frio, dependendo das características desejadas no produto.

Na laminação, uma deformação de redução de área é causada por dois cilindros de trabalho que giram em sentidos opostos, vide Figura 1. A principal vantagem da

laminação é a habilidade para produzir perfis de peças relativamente grandes com uma velocidade rápida em processo contínuo.

Muitos metais de engenharia, como as ligas de Alumínio, as ligas de Cobre e Aços são provenientes de lingotes processados por laminação a quente em blocos, placas e tarugos, que são re-laminados em processos subsequentes produzindo chapas grossas, tiras, tubos, arames, barras e perfis estruturais, vide Figura 2 (*American Society for Metals - ASM Handbook, 1998*).

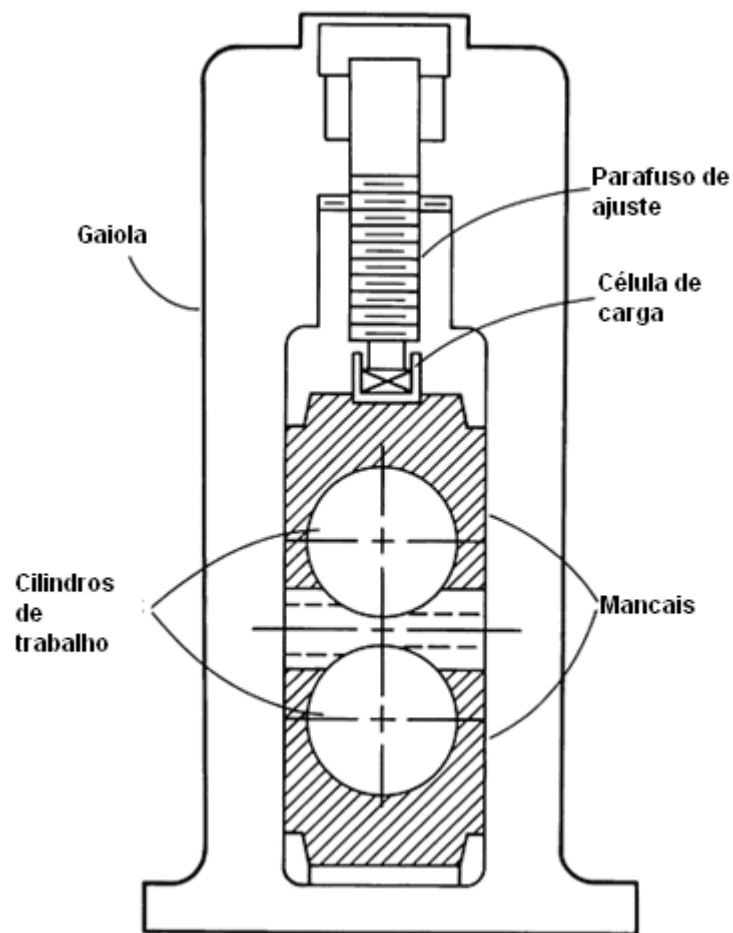


Figura 1 – Típica Gaiola de Laminação (ASM Handbook Vol.14, 1998, p. 741).

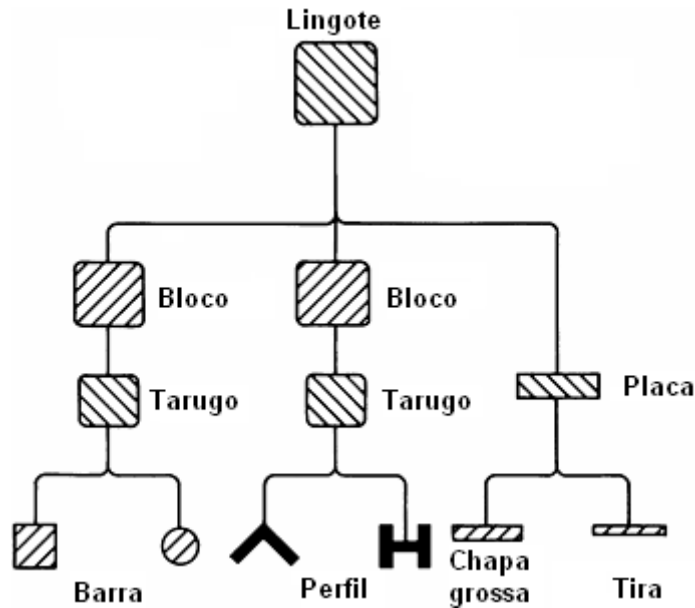


Figura 2 - Seqüência de laminação de barras, perfis e produtos provenientes de blocos, tarugos e placas (ASM Handbook Vol.14, 1998, p. 742).

No processo de laminação, podem existir vários tipos de laminadores. A classificação dos laminadores é feita pelo tamanho, tipo de produto laminado e arranjo dos cilindros de laminação. Um laminador consiste basicamente de cilindros, mancais, uma carcaça chamada de gaiola e um motor para fornecer potência aos cilindros e controlar a rotação, como mostra a Figura 1.

A Figura 3 mostra os tipos mais comuns de laminadores, utilizados de acordo com o produto desejado. Nesta figura dois cilindros de laminação diferentes podem ser observados: Cilindro de Trabalho e Cilindro de Encosto.

Utilizam-se variadas disposições de cilindros na laminação, a mais simples é constituída por dois cilindros de eixo horizontais, colocados um sobre o outro, como mostra a Figura 3a. O equipamento com esta disposição de cilindros é chamado de laminador duo.

Na configuração de laminador mostrada na Figura 3c, são empregados simultaneamente os cilindros de trabalho e de encosto. À medida que se laminam materiais cada vez mais finos, há interesse em utilizar cilindros de trabalho de pequeno diâmetro. Estes cilindros podem sofrer flexão e, devido à necessidade de precisão ao longo de toda a mesa do laminador, precisam ser apoiados. Para fornecer este apoio, os cilindros de encosto exercem força ao longo de todo o comprimento dos cilindros de

trabalho. Os cilindros de trabalho são os que entram em contato com o material; e, por entrarem em contato direto com o material, requerem propriedades mecânicas e metalúrgicas mais rigorosas do que os cilindros de encosto.

Os cilindros de laminação podem ser obtidos por fundição ou forjamento, sendo que cada processo de fabricação e material conferem propriedades específicas, adequadas a cada aplicação.

Os cilindros fundidos podem ser de ferro fundido (nodular, coquilhado, cinzento, alto cromo e compostos) ou de aço fundido (alto cromo e aço rápido). Os cilindros forjados, de aço (aço ferramenta e aço cromo).

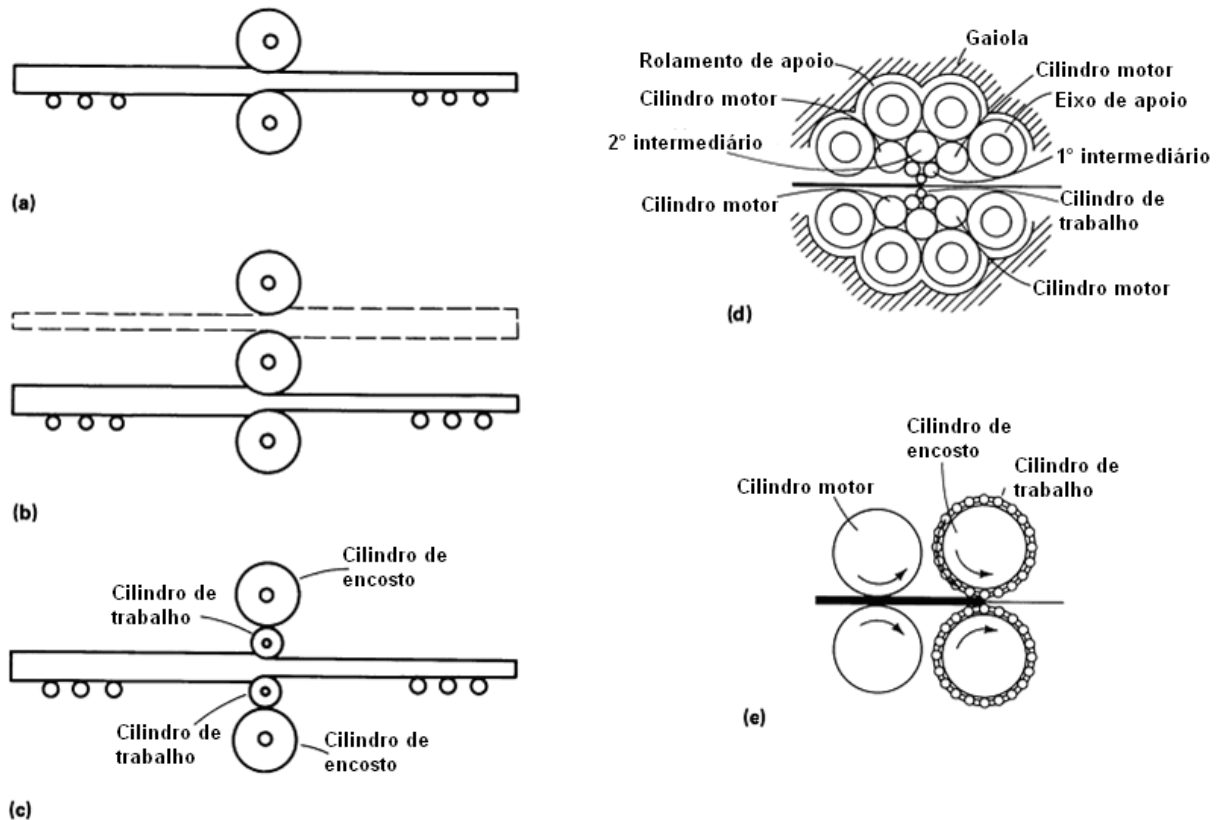


Figura 3 – Arranjos típicos de laminadores: (a) - laminador duo; (b) - laminador trio; (c) - laminador quádruo, (d) - laminador Sendzimir e (e) - laminador planetário (ASM Handbook Vol.14, 1998, p. 765).

A fundição pode ser estática ou centrífuga. Como concluiu Chirita (2006), o processo de fundição centrífuga é mais eficaz em termos de obtenção de melhores propriedades mecânicas e resistência à fadiga quando comparados ao processo de fundição estática.

A fundição centrífuga apresenta vantagens como: baixo consumo de energia, pouca geração de resíduos, simplicidade e alta eficiência.

1.3 Estrutura do trabalho

No Capítulo 2 deste trabalho, são apresentados detalhadamente os tipos de cilindros fundidos pelos processos de fundição estática e centrífuga. Ambos os processos estão descritos e comparados. Apresentam-se os defeitos mais comuns na fundição centrífuga, os tipos de máquinas utilizadas e as variáveis dinâmicas no processo de centrifugação.

No Capítulo 3 as variáveis de processo são mostradas mais detalhadamente.

No Capítulo 4 é feito um estudo de caso de diversos cilindros fundidos por centrifugação e suas características, visando obter uma análise comparativa com as variáveis dinâmicas de processo.

No Capítulo 5 são discutidos os resultados obtidos.

O Capítulo 6 traz as conclusões deste trabalho e proposta para trabalhos futuros.

2 EQUIPAMENTOS E PROCESSOS

A fundição centrífuga é um processo avançado de fabricação de cilindros de laminação, possibilitando a obtenção de produtos de alta qualidade em termos de propriedades metalúrgicas e mecânicas. Através do incremento das pesquisas neste campo, atualmente, o processo tem evoluído de forma significativa, principalmente na tecnologia agregada às máquinas centrífugas.

2.1 Produtos

De todos os componentes de um laminador, os cilindros de laminação são provavelmente os de maior interesse, por conta do controle da redução e conformação do material laminado.

De acordo com ASM Handbook (1998), o cilindro de laminação é dividido em três partes principais: a mesa (onde, de fato, a laminação ocorre), os pescoços (que suportam o corpo e seguram a pressão de laminação) e as pontas, conhecidas por *wobbler*, onde a força motriz é aplicada.

Os cilindros devem ter boa resistência ao desgaste, serem resistentes à flexão, à torção e ao esforço cortante a que são submetidos. Para a laminação à quente, devem ainda resistir à fadiga térmica.

Os cilindros são projetados por empresas de engenharia e fabricantes de cilindros, com exceção dos passes e canais, que são projetados pela oficina do usuário do laminador. As proporções são baseadas na aplicação e no tipo de laminador. A largura do material a ser laminado determina o comprimento da mesa. O diâmetro é calculado para garantir a profundidade necessária a ser reduzida por passe, e fornecer massa suficiente para que o cilindro resista à flexão e esforço cortante.

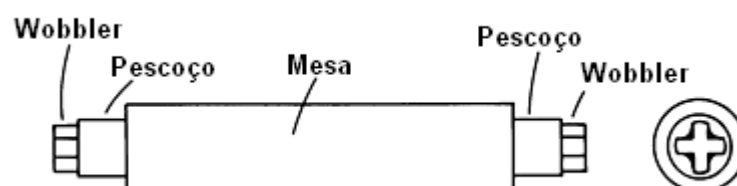


Figura 4 – Desenho ilustrativo de um cilindro de laminação (ASM Handbook Vol.14, 1998, p. 766).

Quanto menor o diâmetro do cilindro, menor a área de contato com o metal laminado e menor a pressão de laminação requerida. Consequentemente a força de laminação e potência para uma dada redução é menor.

No projeto de cilindros para laminadores de chapa, os canais mais profundos devem ser colocados o mais longe possível do centro do cilindro, para se situarem onde o momento fletor é mínimo.

O tamanho do cilindro é designado pelo diâmetro e pelo comprimento da mesa, respectivamente. A redução abrupta de diâmetro da mesa para o pescoço faz com que as tensões de flexão e torção sejam intensificadas neste local. Para prevenir prováveis rupturas, o diâmetro do pescoço deve ser o maior possível.

As dimensões do pescoço são determinadas pelas cargas de flexão e pelo projeto do rolamento. A razão entre o diâmetro do pescoço e da mesa depende de variáveis como o tipo de rolamento, tipo de laminador e condições de trabalho. Estima-se que esta razão não deve ser menor que 50%.

2.1.1 Materiais e aplicação dos cilindros de ferro fundido

Os cilindros fundidos estaticamente ou por fundição centrifugada, podem ser feitos de ferro ou aço fundido (ASM Handbook, 1998).

Os cilindros de ferro fundido podem ser: cilindros ferro fundido coquilhado, ferro fundido cinzento indefinido, ferro fundido em areia não coquilhados (fundição estática), ferro fundido nodular e cilindros compostos.

Os cilindros de ferro fundido são usados como obtidos na fundição ou após alívio de tensões. Os cilindros de ferro fundido de alta liga são tratados sendo submetidos a altas temperaturas e depois a tratamentos em baixa temperatura. Os ferros fundidos usados para cilindros são meta-estáveis e podem ser brancos ou cinzentos, dependendo da composição, inoculação, taxa de resfriamento, etc.

Quadro 1 – Aplicações de cilindros de ferro fundido (baseado em ASM Handbook Vol.14, 1998, p. 767).

Material do cilindro		Aplicação
Ferro fundido coquilhado	Não ligado	Laminadores a frio e a quente de chapas finas, de chapas trio e duo, de tiras a quente, fio máquina, perfis, chapas e barras.
	Ligado	Laminadores a frio e a quente de chapas finas, de tiras, de chapas trio e duo, universais, barras e perfis.
Ferro fundido cinzento	Maleável	Laminadores pequenos de perfis e barras
	Meio-duro	Laminadores de perfis, barras e perfis estruturais grandes.
	Duro	Laminadores de perfis, barras, perfis estruturais, chapas finas, barras, tiras e tubos sem costura.
Não coquilhado (fundido em areia)		Laminadores pequenos e de perfis estruturais grandes.
Nodular		Laminadores de barras e perfis, tubos e vários outros.

Cilindros de ferro fundido coquilhado – Dureza 50 a 90 HSc: O cilindro deste material apresenta uma camada superficial definida e homogênea em ferro fundido branco na mesa, separada do centro da mesa, de ferro fundido cinzento, por uma linha fina.

Ferro fundido cinzento (indefinido) – Dureza 40 a 90 HSc: O cilindro deste material apresenta uma superfície de grafita fina, que se torna escamosa na parte interna do cilindro. Possui alta resistência ao desgaste e capacidade de acabamento para profundidades elevadas.

Ferro fundido em areia (não coquilhado) – Dureza 35 a 45 HSc: O cilindro deste material é fundido estaticamente em moldes de areia. A mesa pode ser endurecida nos canais usando anéis de ferro fundido no molde.

Ferro fundido nodular – Dureza 50 a 65 HSc: O cilindro deste material é feito de ferro e nodularizado durante a fabricação, pela adição de magnésio sob condições controladas durante a solidificação. O material final tem propriedades mecânicas (resistência e ductilidade) entre o ferro fundido cinzento e o aço.

Composto – Dureza da mesa 70 a 90 HSc, dureza do pescoço 40 a 50 HSc: Os cilindros compostos possuem mesa em ferro ligado, duro e resistente ao desgaste, e pescoço, *wobblers* e centro em material mais macio. São capazes de resistir a impactos e estresse térmico.

2.1.2 Materiais e aplicação dos cilindros de aço fundido

Os cilindros de aço fundido não podem ser diferenciados dos cilindros de ferro estritamente pelo teor de carbono. Cilindros de ferro fundido exibem grafita livre e os cilindros de aço não exibem grafita livre (ASM Handbook, 1998).

A dureza do cilindro de aço fundido ligado equivale a dureza dos cilindros de ferro fundido mais macios, e a ductilidade superior os tornam preferenciais.

A aplicação dos cilindros de aço fundido é feita de acordo com o teor de carbono.

Quadro 2 – Aplicações de cilindros de aço fundido (baseado em ASM Handbook Vol.14, 1998, p. 769).

Teor de carbono (%)	Aplicação
0,50 a 0,65	Laminadores onde só é exigida resistência
0,70 a 0,85	Laminadores de blocos, chapas grossas e finas.
0,90 a 1,05	Laminadores de blocos, placas, barras. Usados também como cilindros de encosto.
1,10 a 1,25	Laminadores de blocos, placas, barras e perfis estruturais.
1,35 a 1,55	Laminadores de barras e perfis estruturais.
1,60 a 1,80	Laminadores de barras e trio.
1,85 a 2,05	Laminadores de perfis estruturais, laminadores pequenos.
2,10 a 2,60	Cilindros de acabamento para condições especiais.
2,65 e acima	Aplicações especiais.

2.1.3 Cilindros fundidos de fabricante brasileiro

A Villares Rolls é a terceira maior produtora mundial de cilindros forjados e fundidos para laminação. Atualmente o negócio pertence ao grupo Gerdau.

De acordo com o site da Villares Rolls, sua capacidade de produção é de 3.600 toneladas por mês. A linha de produção de cilindros fundidos da Villares Rolls é apresentada no Quadro 3.

Quadro 3 – Cilindros fundidos por Villares Rolls

Material	Liga	Aplicação	
Aço Fundido Centrifugado	Alto cromo	Laminadores de tiras a quente	
	Aço rápido	Laminadores fio máquina / vergalhões	
Ferro fundido	Alto cromo	Laminadores de tiras a quente	
	Coquilhado	Laminadores de tiras a quente	
	Microligado	Laminadores de tiras a quente	
	Nodular		Laminadores de perfis
			Laminadores fio máquina / vergalhões
	Indefinido nodular		Laminadores fio máquina / vergalhões
	Definido nodular		Laminadores fio máquina / vergalhões

Cilindros de trabalho para as cadeiras desbastadoras dos laminadores de tiras a quente:

Fabricados em aço alto cromo obtido de fornos de indução, estes produtos são centrifugados. Este processo lhes proporciona uma excelente homogeneidade estrutural. Eles são usados em cadeiras de desbaste com núcleos nodulares de elevada resistência que satisfazem às atuais solicitações de alta produtividade dos laminadores.

Cilindros de trabalho para cadeiras de acabamento em laminadores de tiras a quente:

São fundidos em fornos de indução e centrifugados posteriormente, resultando em excelente homogeneidade estrutural. São utilizados nas primeiras cadeiras e nas cadeiras acabadoras com núcleos de ferro fundido cinzento ou de ferro fundido nodular, ambos de alta resistência, satisfazendo às necessidades de laminadores de alta produtividade.

Podem ser fabricados em aço-rápido, ferro fundido de alto cromo e ferro indefinido microligado que satisfazem os mais exigentes requisitos de qualidade e produtividade para laminadores com níveis baixos de desgaste de cilindro.

Cilindros fundidos para as cadeiras de desbaste para produtos longos:

Fabricados com ferro fundido nodular com matriz bainítica, apresentam excepcional desempenho em aplicações que exigem elevada tenacidade, além de resistência ao desgaste e resistência à oxidação.

Cilindros fundidos para cadeiras de acabamento de produtos longos:

A Villares Rolls produz cilindros de ferro nodular, cilindros de ferro indefinido e definido, para vergalhão, arame, laminadores de perfis leves, médios e pesados. Podem ser fabricados por fundição convencional e por fundição centrífuga com núcleo cinzento ou nodular.

2.2 Processos de fundição centrífuga

O processo de fundição centrífuga consiste na fundição de peças através da solidificação de metal líquido num molde rotativo.

Como pode ser visto esquematicamente na Figura 5, no processo de fundição centrífuga, a liga metálica é depositada no centro de uma máquina rotativa e, através do movimento desta e dos moldes que giram concentricamente à máquina, o metal se precipita em direção à parede dos moldes pela força centrífuga. Devido à pressão que a força centrífuga imprime ao metal quando este atinge às paredes do molde, eliminam-se poros e rechupes, comuns na fundição convencional (estática).

A grande vantagem da fundição centrífuga em comparação à fundição convencional é a redução de gases e porosidades no produto final, permitindo a

obtenção de melhores propriedades mecânicas. Através de tratamentos superficiais, pode-se combinar uma superfície dura com um núcleo mais dúctil. Outra aplicação da fundição centrífuga são peças bi-metálicas, com duas camadas concêntricas de materiais diferentes.

Podem-se citar dois tipos principais de fundição centrífuga, classificadas de acordo com a orientação do eixo de rotação da máquina: fundição centrífuga horizontal e fundição centrífuga vertical, que são mostradas na Seção 2.2.1 e 2.2.2.

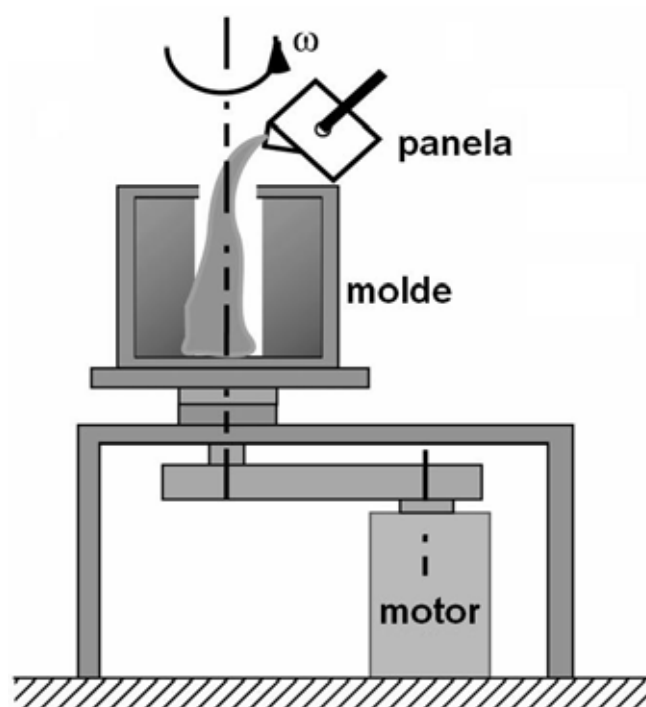


Figura 5 – Desenho esquemático de um processo de fundição centrífuga (Gao, J.W.; Wang, C.Y., 1999).

2.2.1 Fundição centrífuga horizontal

Na centrifugação horizontal a máquina centrífuga possui um eixo de rotação horizontal. A força centrífuga gerada pela rotação impele o metal em fusão contra a parede do molde, gerando a geometria pretendida.

O processo de fundição por centrifugação horizontal é usado para produzir peças que possuem um eixo de revolução horizontal. A produção de fundidos baseia-se na força centrífuga gerada pela rotação de uma moldação cilíndrica que impele o metal

em fusão contra a parede do molde para desta forma gerar a geometria pretendida. Inicialmente este processo era usado para a produção de ferro fundido cinzento de paredes finas, ferro fundido maleável e tubos de ligas de cobre. Mais recentemente este processo é aplicado em todo o tipo de peças cilíndricas usadas em inúmeras indústrias.

2.2.2 Fundição centrífuga vertical

No processo por centrifugação vertical a máquina centrífuga possui um eixo de rotação vertical. O material injetado no interior da máquina, aderindo às paredes do molde e girando de acordo com a velocidade de rotação do mesmo.

De acordo com ASM Handbook (1998), o processo de fundição por centrifugação vertical tem uma gama de aplicação maior, sendo usado para produzir peças que não são simétricas e/ou cilíndricas. Os processos de fundição vertical dividem-se em três variantes:

➤ Fundição centrífuga propriamente dita

Neste processo de fundição, a forma da superfície da peça deriva da própria centrifugação, sendo, portanto, cilíndrica e de espessura determinada pela quantidade de material vazado. É o caso dos tubos vazados por centrifugação, e que assim não necessitam de macho.

Quando se faz o enchimento, o material tende a ficar imóvel por inércia e, só por atrito é que a moldação lhe vai comunicando um momento cinético. Por isso, quando se faz o vazamento, a velocidade tem de ser bem controlada para assim garantir que o metal agarre imediatamente às paredes. De fato, se a velocidade de rotação for excessiva, o metal líquido em vez de rodar com o molde, escorre sem o acompanhar na rotação.

➤ Fundição semi-centrifugada

Neste caso, a forma do fundido é dada essencialmente pela moldação e a centrifugação destina-se apenas a assegurar uma pressão superior do que a pressão

devida à altura da coluna líquida estática (originada pelo peso próprio do metal). É o caso das rodas vazadas em fundição semi-centrifugada.

➤ **Fundição sob pressão devida à centrifugação**

Este processo de fundição distingue-se dos outros dois tipos pelo fato de o eixo de rotação ser exterior à peça.

Tal como nos outros processos, é necessário garantir o equilíbrio em rotação, pois se tal não suceder, surgem vibrações que reduzem qualidade aos fundidos.

A condição ideal é a de haver equilíbrio antes do vazamento; isto exige que os moldes sejam simétricos ou que sejam vazados simultaneamente em peças iguais e dispostas simetricamente. Se tal não for possível, utiliza-se um dispositivo com contrapeso que equilibre a moldação. Como neste último caso não se pode equilibrar simultaneamente a moldação vazia e a moldação cheia, deve procurar-se então o equilíbrio quando está cheia, com o metal a solidificar, pois é nesse momento que se devem evitar vibrações.

Outro ponto a considerar é a escolha das ligas, pois nem todas são adequadas ao vazamento por centrifugação. Não o são, por exemplo, quando algum dos seus elementos tem densidade muito diferente, pois estes tendem a se separar, ficando os mais densos nas zonas de maiores diâmetros. É o caso da maior parte dos metais brancos. No caso dos metais não adequados para centrifugação, o resultado obtido caracteriza-se pelo fato do interior das peças ficar mais macio. As segregações por diferenças de densidade podem ser um problema em ligas que contenham elementos de ligas imiscíveis ou pesados.

2.2.3 Vantagens da fundição centrífuga

De acordo com Chirita (2006) o processo de fundição centrífuga é muito mais efetivo em termos de obtenção de propriedades mecânicas em comparação com o processo de fundição estática. O efeito da força centrífuga pode aumentar a força de ruptura, a deformação de ruptura e o módulo de Young da peça final, pela redução de gases e porosidades no metal.

Outras vantagens da fundição centrífuga citadas por ASM (1998) são:

- Flexibilidade na composição química – Na fundição centrífuga em máquinas horizontais, as únicas composições químicas não-utilizadas são os aços alto-carbono (0,4 a 0,85% C), por conta de problemas com segregação de carbono.
- Ampla faixa de microestruturas – Os produtos podem ser produzidos com uma ampla faixa de microestrutura para atender a demandas específicas. Essa faixa é possibilitada através do grande controle da microestrutura, limpeza e homogeneidade.
- Flexibilidade dimensional – Os tubos produzidos por fundição centrífuga em máquinas horizontais podem possuir diâmetros de 200 a 1600 mm.

2.2.4 Defeitos na fundição centrífuga

Os defeitos mais comuns na fundição centrífuga são: trincas, segregação e *banding*.

- Trincas – As trincas de contração são desenvolvidas na fundição centrífuga por conta das altas rotações utilizadas, da ordem de 1.000 rpm. As trincas longitudinais ocorrem quando a contração da fundição, combinada com a expansão do molde, geram tensões circunferenciais que excedem a resistência à tração do metal às temperaturas da região *solidus*. De acordo com Hanguang (2008), o molde, a pintura do molde, a velocidade e temperatura da coquilha e a taxa de resfriamento influenciam a formação de trincas nos cilindros fundidos de aço rápido.
- Segregação – Ocorrem várias formas de segregação de constituintes menos densos para camadas mais afastadas do centro da material fundido. Hanguang (2008) conclui que, para cilindros fundidos de aço rápido, os fatores principais para o aumento da segregação são: a velocidade da centrífuga, a taxa de resfriamento e a característica de rede atômica do material. Quanto maior a rotação e quanto menor a taxa de resfriamento, maior será a segregação no produto final.

- Segregação na interface – Especificamente para o caso de cilindros fundidos com diversas camadas, pode ocorrer segregação na interface entre as camadas.
- *Banding* (Segregação em faixas) – Às vezes a fundição produz um segregado de constituintes de baixo ponto de fusão, que apresentam fase eutética, como sulfetos e óxidos. Várias teorias explicam este defeito, apontando como causa principal o estado de vibração.

2.3 Tipos de máquinas centrífugas

As máquinas centrífugas atuais combinam tecnologia mecânica em termos de materiais e elementos de máquinas de última geração, com os avanços da eletrônica. Dessa forma, tais máquinas tem funcionalidades como controle de aceleração e medição de vibração em qualquer ponto da máquina, através de sensores instalados nos eixos X, Y e Z. As funcionalidades agregadas às máquinas centrífugas tem permitido o avanço na fabricação de cilindros de laminação com novas classes de materiais, promovendo mais qualidade e durabilidade em sua utilização (ASM, 1998).

Existem basicamente dois tipos de máquinas centrífugas para fundição: a máquina centrífuga horizontal, que gira em torno de um eixo horizontal, e a máquina centrífuga vertical, que gira em torno de um eixo vertical.

2.3.1 Máquina centrífuga horizontal

De acordo com ASM Handbook (1998), uma máquina de fundição por centrifugação horizontal baseia a produção de um fundido em quatro funções, que deve executar com precisão e de uma forma sistemática:

- A velocidade de rotação da moldação tem de ser regulável;
- A máquina tem de possuir uma forma de espalhar o metal em fusão na moldação rotativa;

- A velocidade de derramamento do metal deve ser constante, por forma a evitar variações na espessura do fundido;
- A máquina deve permitir a extração do fundido.

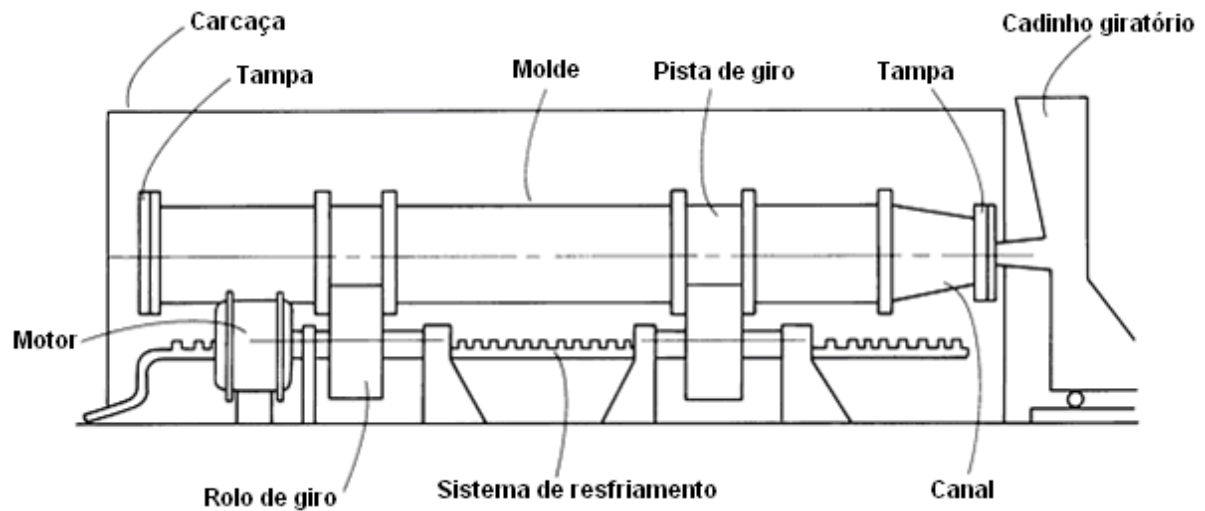


Figura 6 - Esquema de um projeto de máquina centrífuga horizontal (ASM Handbook Vol.15, 1998, p. 633).

Além do projeto mostrado na Figura 6, existem máquinas com características diferentes, por exemplo, o tipo de motorização, rolos de giro, etc.

2.3.2 Máquina centrífuga vertical

As máquinas centrífugas verticais são usadas na produção de fundidos de diâmetros relativamente grandes e curtos em comprimento. O comprimento máximo usual é de duas vezes o diâmetro externo do fundido.

A capacidade de carga de uma máquina centrífuga vertical é calculada com base na capacidade de carga dos rolamentos de apoio da mesma.

Para propiciar uma operação segura das máquinas centrífugas verticais, são requeridos vários fatores no projeto destas. A força centrífuga no processo é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade de rotação e diretamente proporcional ao raio da peça, medido desde o centro de rotação. Por essa razão, a máquina deve ser centralizada e balanceada estática e dinamicamente.

O método de fechamento das tampas superior e inferior ao molde é importante, devido à força que o metal imprime ao molde durante o giro. Os moldes devem ser montados por interferência, para garantir que resistam à força centrífuga.

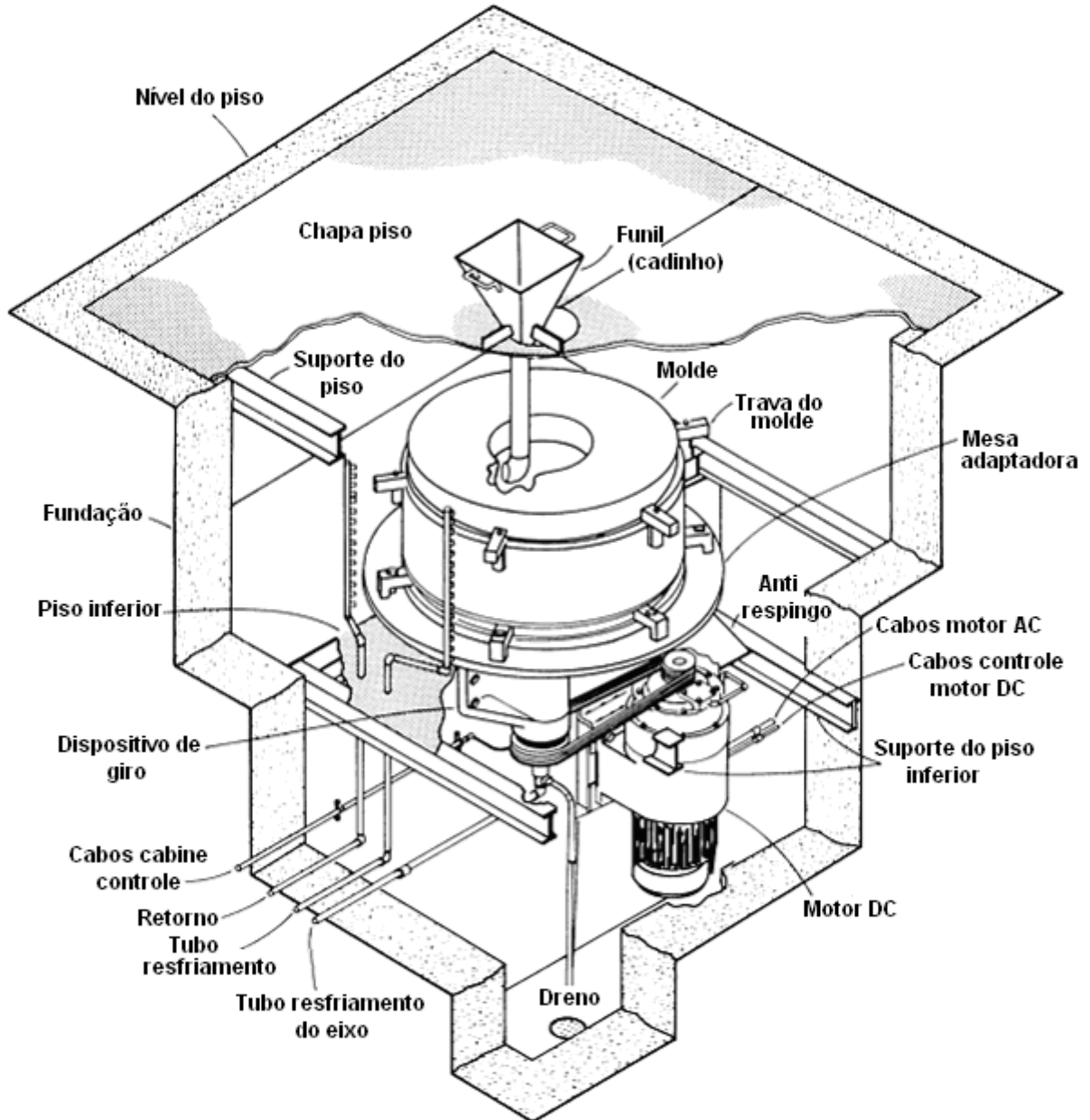


Figura 7 - Instalação típica de uma máquina centrífuga vertical (ASM Handbook Vol.15, 1998, p. 660).

Como durante a fundição ocorre dilatação térmica dos materiais, é importante conhecer todas as forças envolvidas nos elementos de fixação dos moldes e tampas, para que tais elementos sejam corretamente projetados.

A Figura 7 ilustra a instalação de uma centrífuga vertical, que é feita abaixo do nível do piso para garantir uma operação segura.

3 ESTUDO DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO

As principais variáveis dinâmicas controladas no processo de centrifugação são: rotação, velocidade e aceleração da máquina centrífuga, vazão de metal, intervalos de tempo de centrifugação e vibração nos três eixos.

Porém, sabe-se que existem variáveis envolvidas desde o projeto da máquina, como o esforço que sofrem os rolamentos, principalmente na centrifugação vertical.

3.1 Rotação e aceleração

A rotação da centrífuga tem grande influência na qualidade da peça fundida e a determinação da rotação ideal é essencial na fundição centrífuga. Se a rotação for adequada, haverá rápida solidificação com vibrações mínimas. Se a rotação for baixa, ocorrerá escorregamento de metal. Se a rotação for alta aparecerão defeitos na peça final, como trincas longitudinais.

De acordo com ASM Handbook (1998), considera-se que a força centrífuga ideal ocorra na faixa de rotação em que a razão entre a força centrífuga e a gravitacional (chamada pela literatura especializada simplesmente de G) esteja entre 75 e 120, medidos no diâmetro interno da casca. O ciclo de rotação no processo de fundição centrífuga pode ser dividido em três partes, como mostra a Figura 8. No vazamento, a rotação do molde é suficiente para jogar o metal contra as paredes do molde. Quando o metal atinge o final do molde, aumenta-se a rotação. Após o término do vazamento a rotação é mantida constante por um período de tempo, que varia em função do tipo de molde, material e espessura da casca.

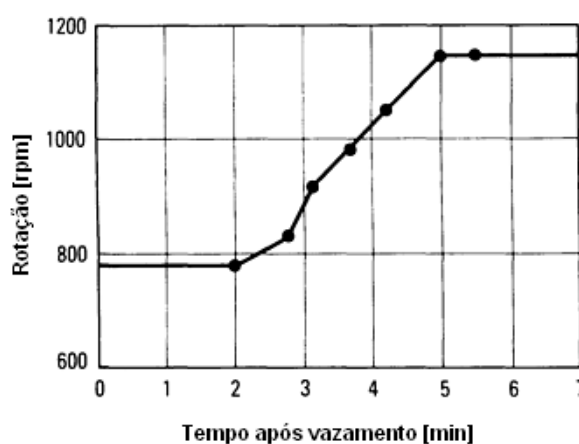


Figura 8 - Ciclo de rotação típico de uma máquina centrífuga horizontal (ASM Handbook Vol.15, 1998, p. 635).

Para as máquinas centrífugas verticais recomenda-se não ultrapassar a razão G de 200 no diâmetro externo, para garantir a segurança do processo.

Para aproximações de cálculo, podemos considerar a máquina centrífuga vertical e o metal derramado no seu interior como um corpo cilíndrico girando em torno do seu eixo de simetria.

Sabe-se que as forças atuantes nesse movimento são as forças centrífuga e gravitacional. Pode-se escrever o módulo da força centrífuga como:

$$F_c = m.a_n \quad (1)$$

$$F_c = \frac{m.v^2}{r} \quad (2)$$

Onde: m = Massa do corpo [kg]

a_n = Módulo da aceleração normal [m/s^2]

Ω = Velocidade angular [rad/s]

r = Raio do corpo [m]

v = Velocidade linear [m/s]

Pode-se escrever o módulo da força gravitacional como:

$$F_g = m.g \quad (3)$$

Onde: m = Massa do corpo [kg]

g = Módulo da aceleração da gravidade [m/s^2]

A razão entre a força centrífuga e a força gravitacional, é a razão G, que mede quantas vezes a força centrífuga é maior que a força gravitacional:

$$G = \frac{F_c}{F_g} \quad (4)$$

$$G = \frac{m.v^2}{r.m.g} \quad (5)$$

$$G = \frac{v^2}{r.g} \quad (6)$$

$$G = \frac{\Omega^2 . r}{g} \quad (7)$$

Pode-se calcular a rotação da centrífuga em função da razão G e do diâmetro do considerado, em RPM:

$$N = \sqrt{\frac{G.g}{r}} \quad (8)$$

$$N = \sqrt{\frac{G.g}{\frac{D}{2}}} \cdot \frac{60}{2\pi} \quad (9)$$

$$N = 42,3 \sqrt{\frac{G}{D}} \quad (10)$$

Onde: N = Rotação da centrífuga [RPM]

D = Diâmetro [m]

3.2 Forças e momentos

Nas máquinas centrífugas verticais, toda a carga dinâmica existente no eixo vertical é suportada por rolamentos de apoio, que giram na rotação de trabalho da centrífuga. A função dos rolamentos é permitir o movimento relativo entre a parte rotativa e os mancais de apoio.

Tipicamente, são utilizados dois rolamentos: um rolamento rígido de esferas e outro de rolos cônicos, que suporta as cargas radiais (na direção x) e axiais (na direção z). A carga na direção vertical (z) pode ser escrita como:

$$\vec{F}_z = \vec{P}_c + \vec{P}_M \quad (11)$$

Onde: \vec{F}_z = Esforço dinâmico na direção z [N]

\vec{P}_c = Peso da centrífuga [N]

\vec{P}_M = Peso do metal [N]

Alguns fabricantes possuem sistemas hidráulicos que absorvem parte da carga vertical nos momentos de rotação mais elevada.

A capacidade de carga da máquina está diretamente ligada à rotação em que a máquina está trabalhando, uma vez que o esforço dinâmico nos rolamentos depende da rotação.

Pode-se então, representar graficamente a capacidade de carga da centrífuga em um gráfico que é intitulado “envelope de carga”. A Figura 9 demonstra um envelope de carga:

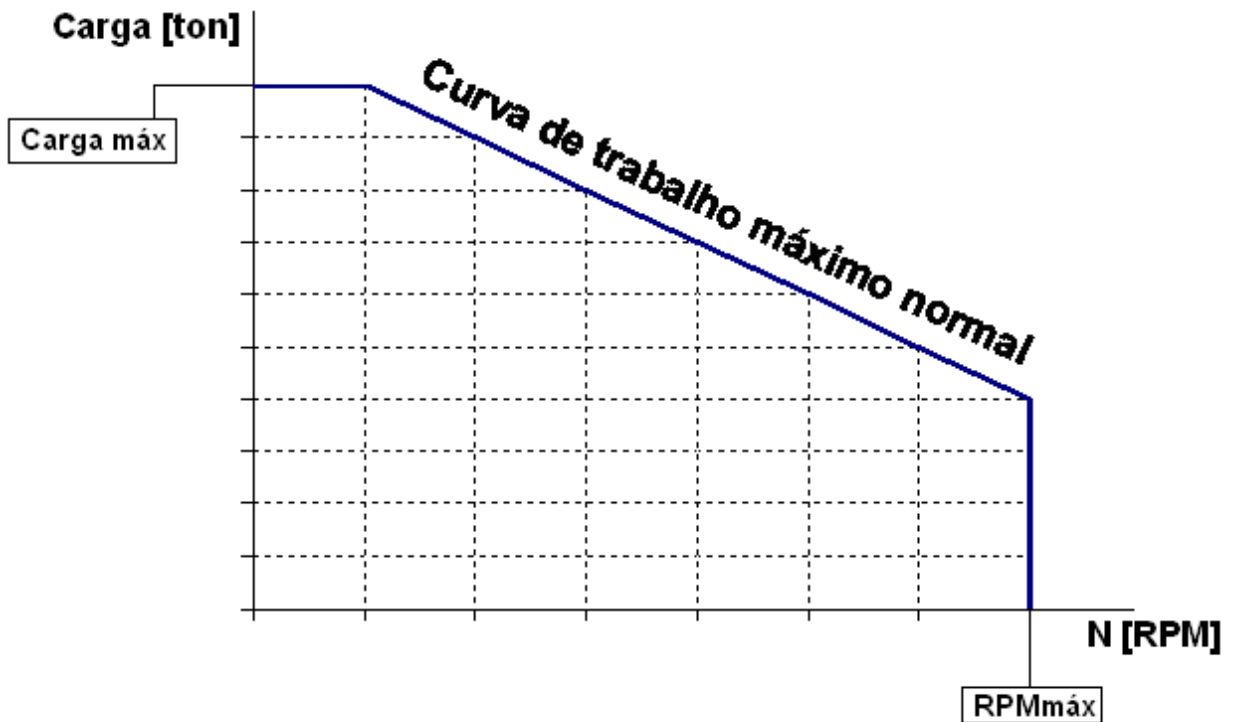


Figura 9 - Exemplo de um envelope de carga

Como traz o envelope de carga mostrado na Figura 9, cabem algumas definições:

$RPM_{máx}$ é a rotação máxima a que os rolamentos podem ser submetidos, dado o tipo de rolamento, lubrificante e fatores como manutenção, confiabilidade e período de trabalho.

$Carga_{máx}$ é a capacidade máxima de carga dos rolamentos.

Curva de trabalho máximo normal é definida pela vida que se deseja dos rolamentos, dada a rotação e carga de trabalho. De acordo com ASM (1998), as centrífugas verticais são projetadas para uma vida L10 de 1.000.000 horas.

Então, a curva de trabalho máxima normal pode ser calculada em função da vida L10, rotação e carga de trabalho:

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^p \cdot 10^6 \quad (12)$$

$$L.N = \left(\frac{C}{P}\right)^p \cdot 10^6 \quad (13)$$

$$P = C \cdot p \sqrt{\frac{10^6}{N \cdot L}} \quad (14)$$

Onde: C = Capacidade de carga dos rolamentos [N]

P = Fz = Esforço dinâmico na direção z [N]

p = Constante dada pelo fabricante, dependendo do tipo de rolamento

L = Vida dos rolamentos [min]

N = Rotação de trabalho [RPM]

3.3 Trajetória do metal líquido

O derramamento do metal é efetuado pelo topo da centrífuga e a velocidade de derramamento varia de acordo com o metal utilizado e o tamanho da peça a ser produzida. O escoamento de metal determina a qualidade e as características do produto final.

Os parâmetros inerentes ao derramamento do metal são empíricos, dependendo de inúmeras variáveis, que englobam inclusive aspectos metalúrgicos do metal a ser centrifugado.

Como dito por Prasad (2010), seguir o escoamento de metal no molde rotativo é extremamente difícil. O escoamento de metal líquido na fundição centrífuga é muito mais complexo do que as equações da hidráulica podem descrever, por conta de fatores como o diferencial de temperatura durante o derramamento de metal no interior da máquina centrífuga.

As ferramentas de simulação através de métodos como método de diferenças finitas, método dos volumes finitos e método dos elementos discretos, por não serem ferramentas desenvolvidas especificamente para simulação de processos de fundição centrífuga de cilindros, trazem dificuldades no momento da definição das condições de contorno do modelo, de acordo com Treviño (2010).

A viscosidade é um fator de influência importante no escoamento de metal líquido na fundição. O metal derramado no molde tem baixa viscosidade. Porém, à medida que o molde resfria, a viscosidade aumenta e a aceleração do metal cresce de acordo com o aumento da fricção no metal; com isso, o metal tende a subir ao longo do interior da parede do molde. Ao mesmo tempo, tende a cair da parte superior do

molde até o molde atingir uma velocidade de rotação crítica. Durante a rotação, o metal solidifica na superfície interna do molde e, simultaneamente, torna-se viscoso o suficiente para ter o agarramento necessário para acelerar junto com o molde para formar um cilindro. As características principais envolvidas durante esses processos são de mecânica dos fluidos.

Outro fator de influência importante no escoamento do metal é a rotação do molde. O excesso de rotação produz tensão de tração muito elevada na periferia do fundido, que resulta em trincas longitudinais. Rotações muito altas fazem com que a formação do cilindro não seja uniforme, e rotações muito baixas favorecem uma formação de baixa qualidade. Observa-se também que rotações mais altas propiciam durezas mais altas no metal fundido, como mostra a Figura 10.

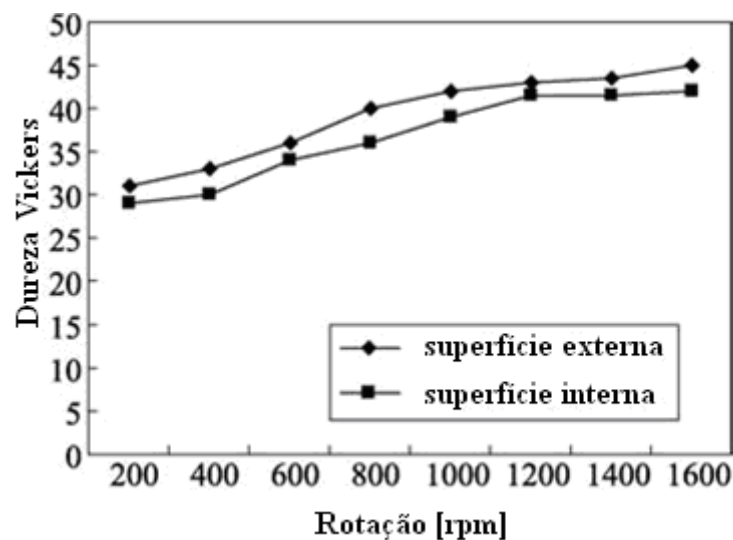


Figura 10 - Rotação do recipiente fundido *versus* dureza da superfície (Prasad, 2010, p. 109).

Como mostrado por Prasad (2010), muitos pesquisadores estudaram o escoamento e trajetória do metal na fundição centrífuga, através de modelos que simulam a centrifugação horizontal de um líquido dentro de um cilindro, variando a viscosidade do líquido, reduzindo a quantidade de fluido para a formação de películas finas, variando gradualmente a velocidade. No entanto, apesar das descrições desses escoamentos estarem na literatura, os parâmetros que os influenciam e a correlação destes com as técnicas para fundição centrífuga não são abundantes. Também, não

existem muitos estudos comparando fluidos com diferentes viscosidades e as propriedades envolvidas durante a rotação na fundição centrífuga.

Prasad (2010) em seu artigo apresenta simulação numérica e modelos a frio para fundição centrífuga. Uma de suas conclusões é de que cilindros que apresentam pequena relação entre o comprimento e o diâmetro (“*Aspect ratio*” L/D), tendem a apresentar mais turbulência devido aos vórtices formados próximos às tampas superiores e inferiores, e sua propagação ao longo de todo o comprimento. Quando a relação entre o comprimento e o diâmetro aumenta, o efeito desses vórtices é atenuado.

Em sua experiência com liga de alumínio fundida, mostra que, para cilindros de espessura reduzida, portanto de baixo volume de material, quanto mais alta a rotação menor é a turbulência no escoamento do metal. Tal fato é evidenciado quando se comparam as rotações de formação dos cilindros mostrados na Figura 12 e 13.

Na Figura 12, mostra-se um cilindro de alumínio com espessura de 4 mm. Para as rotações de 100 e 200 rpm, o material tenta se mover na direção axial ao invés de acompanhar o movimento do recipiente, pois a força centrífuga não é forte o suficiente para arrastar o material. O resultado é um cilindro mal formado, com evidências de distribuição não uniforme do material ao longo do corpo do cilindro. O mesmo acontece a 400 rpm. A partir de 600 rpm, uma distribuição uniforme do material ao longo do corpo do cilindro pode ser observada e, finalmente, a 800 rpm, um cilindro perfeito é formado. Porém, ultrapassando a rotação ideal, a 1000 rpm, a espessura do cilindro formado já não é constante ao longo da circunferência do mesmo. Isto demonstra que existe uma rotação ideal para a centrifugação, dependente do material a ser fundido e da dimensão do molde.

Na Figura 13, num cilindro de alumínio com espessura 6 mm, a rotação de formação do cilindro se dá a 600 rpm, inferior ao cilindro anterior que tem menor espessura.

Os efeitos da viscosidade também foram observados, e se mostraram dependentes de uma rotação crítica. Para fluidos menos viscosos, a formação do cilindro se dá acima de uma rotação crítica elevada, para fluidos mais viscosos, abaixo de uma rotação crítica menor, como mostra a Figura 11.

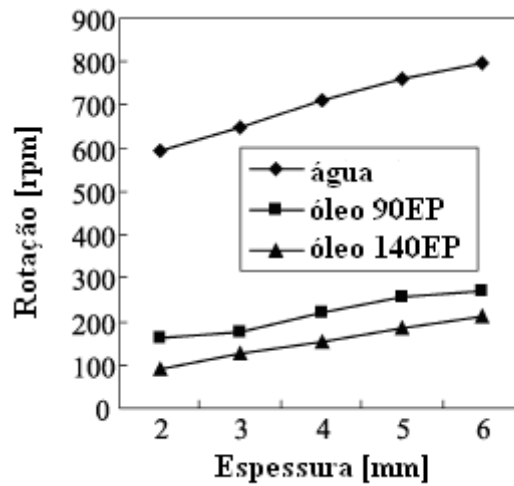


Figura 11 – Rotação de formação *versus* espessura para três materiais (Prasad, 2009, p. 107).

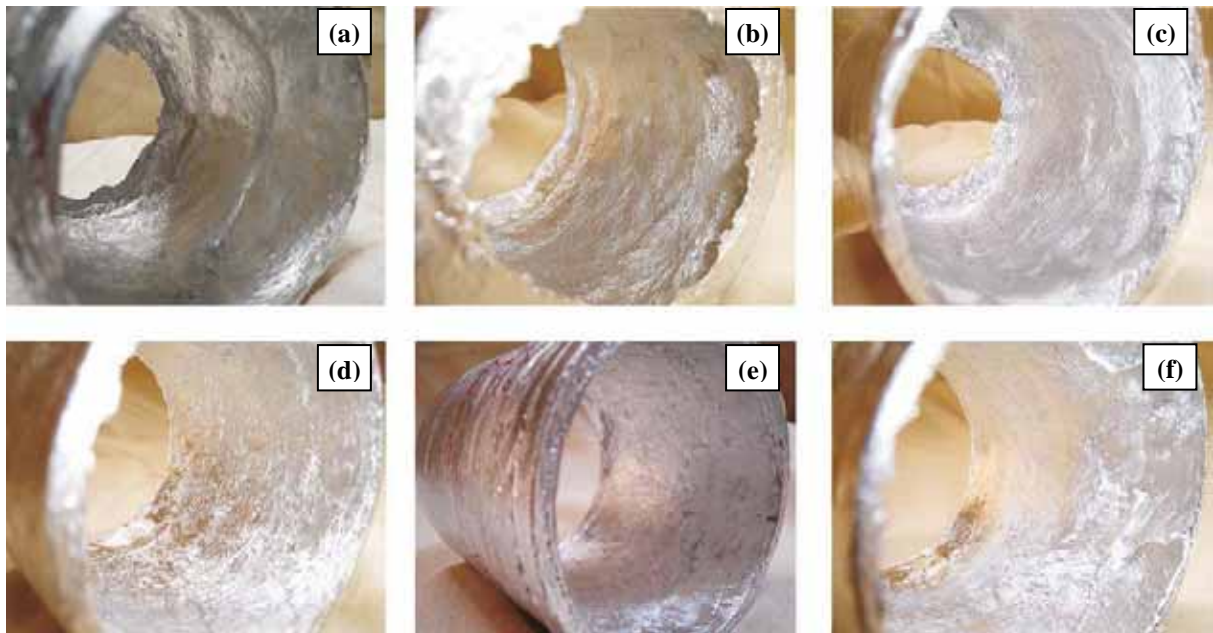


Figura 12 - Casca de alumínio fundida com 4 mm de espessura a: (a) 100 rpm,(b) 200 rpm, (c) 400 rpm, (d) 600 rpm, (e) 800 rpm e (f) 1000 rpm (Prasad, 2009, p. 109).

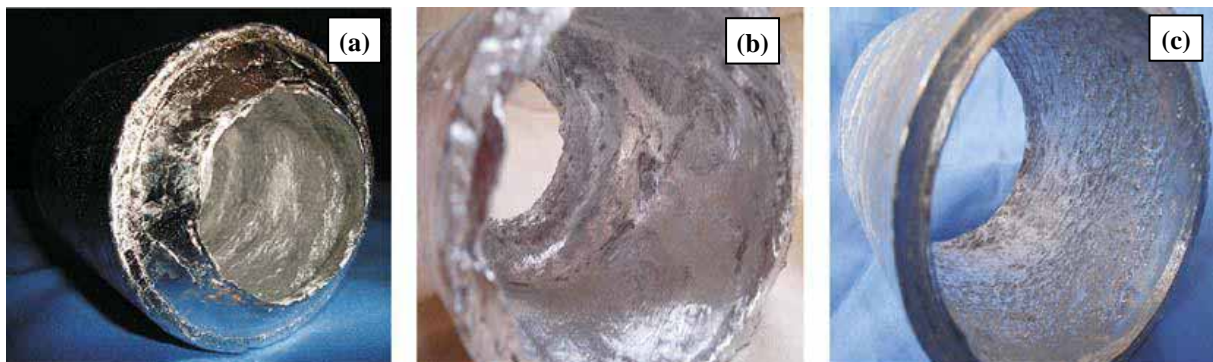


Figura 13 - Casca de alumínio fundida com 6 mm de espessura a: (a) 100 rpm,(b) 200 rpm e (c) 600 rpm (Prasad, 2009, p. 109).

3.4 Estabilidade em centrifugação

O controle da velocidade angular da centrífuga (aceleração e desaceleração) é efetuado de acordo com o metal utilizado, temperatura de fundição e o tamanho da peça a ser produzida, dentre outros parâmetros. Tais parâmetros são empíricos, dependendo de inúmeras variáveis, que englobam inclusive aspectos metalúrgicos do metal a ser centrifugado.

Benton (1974) explica que a aceleração imprimida no início do movimento de centrifugação ao recipiente cilíndrico contendo um fluido, a princípio não afeta grande parte do fluido, e o equilíbrio entre o gradiente de pressão e a força centrífuga é mantido. No entanto, aparentemente, camadas do fluido se movem radialmente próximo às paredes. O fluido que substitui o vazio deixado por essas camadas de fluido também é impelido para as paredes, e o resultado é uma camada sobreposta à primeira. Dessa maneira, a casca fundida é formada.

De acordo com Duck (2001), o diferencial de rotação a que é submetido o recipiente e o material centrifugado, até o ajuste final do fluido à rotação final, é conhecido como *spin-up* (no caso do aumento de rotação, aceleração) ou *spin-down* (no caso de desaceleração, redução de rotação).

O parâmetro para definir a amplitude deste diferencial de rotação é o número de Rossby:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\Omega}{\Omega} \quad (15)$$

Onde: Ω = Velocidade angular inicial [rad/s]

$\Delta\Omega$ = Variação da velocidade angular [rad/s]

Smirnov (2007) estudou a estabilidade de escoamentos rotativos para centrifugação de fluidos estratificados em cilindros simétricos, com tampas paralelas e inclinadas. No seu estudo, Smirnov (2007) afirma que é sabido que a estabilidade do escoamento depende da rotação, força de Coriolis, comprimento do recipiente cilíndrico, espessura da casca fundida e rotação. Observou-se que próximo às tampas do recipiente, onde os efeitos da viscosidade são mais confinados, há presença do escoamento de Ekman, definido pelo número de Ekman:

$$E = \frac{\nu}{\Omega H^2} \quad (16)$$

Onde: ν = Viscosidade cinemática [m²/s]

Ω = Velocidade angular [rad/s]

H = altura do recipiente cilíndrico [m]

Portanto, o principal interesse é a aceleração e a desaceleração da velocidade angular, que representa a variável fundamental na estabilidade dinâmica no spin-up e spin-down. Esse problema se remete a uma questão importante sobre como o torque exercido pelas paredes do recipiente se encaminha até o fluido em rotação. Apesar da condição final ser conhecida (o recipiente e o fluido formam um corpo sólido em rotação), é muito pouco conhecida a trajetória que o fluido executa, como já visto anteriormente na seção 3.3.

Benton (1974) fala que basicamente três fatores determinam como o escoamento de um fluido de densidade uniforme adquire momento angular através de um recipiente: importância relativa das forças viscosas, tensão de aceleração inercial não-linear e geometria do recipiente. Destes, as forças viscosas são determinantes no mecanismo de spin-up, que acontece por difusão. Portanto, o spin-up é determinado pelos valores dos números adimensionais de Ekman e Rossby.

O número de Ekman, grosseiramente falando, mede a razão entre a aceleração viscosa e a força de Coriolis. O número de Rossby, a razão da aceleração inercial não-linear e a força de Coriolis.

Kerswell (2002) estudou uma instabilidade linear no qual escoamentos tridimensionais são gerados, formando linhas elípticas no plano longitudinal. Esta instabilidade é intitulada instabilidade elíptica.

Os modos com que as oscilações no escoamento se apresentam podem ser um modo ou par de modos normais de vibração, em um escoamento circular distorcido que entra em sintonia com o escoamento de tensão adjacente, como pode ser visto na Figura 14. A instabilidade é invariavelmente tridimensional e tem razão de crescimento linear, proporcional a taxa de tensão.

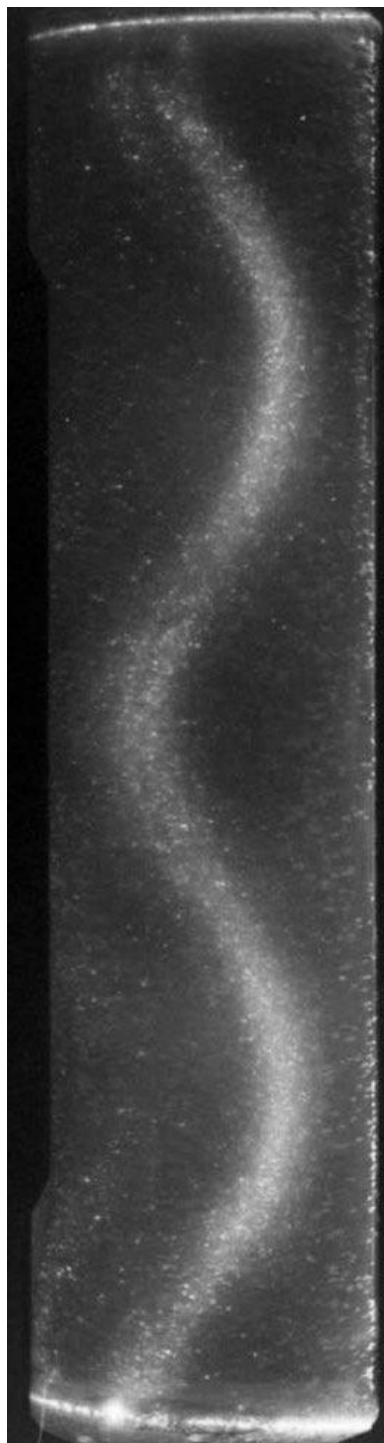


Figura 14 - Exemplo de instabilidade elíptica, indicando ressonância no primeiro modo normal de vibração (Kerswell, 2002, p. 94).

Ensaio de laboratório e modelagem numérica indicam que a severidade do mecanismo de instabilidade se complica com o aumento da velocidade do escoamento, se transformando em desordem. Como resultado, a instabilidade elíptica tem atraído interesse da comunidade científica.

4 ESTUDO DE CASO

Diversas variáveis dinâmicas são controladas no processo de fundição centrífuga, e existem também inúmeras variáveis metalúrgicas que se relacionam com as dinâmicas. Apesar de quem utiliza este processo para fabricação de peças conhecer e controlar os valores destas variáveis na prática, as relações entre as inúmeras variáveis da fundição centrífuga consistem o *know how* dos fabricantes e criadores do processo.

Este trabalho apresenta uma aproximação do ponto de vista dinâmico de diversas variáveis controladas no processo, comparativamente com características básicas do produto final (como dimensões básicas de diâmetro e comprimento de mesa, material do cilindro e peso).

O estudo de caso está baseado em uma amostra de aproximadamente 1.000 cilindros fundidos em uma máquina horizontal, de três tipos diferentes de materiais, com dimensões e pesos conforme mostra o Quadro 4.

Desta amostra, aproximadamente 30 cilindros são cilindros sucateados por problemas de defeitos atribuídos ao processo de fundição, como trincas, segregação e *banding*.

Foi analisado também o envelope de carga de dois modelos de máquinas centrífugas verticais, cujas informações foram extraídas de ASM Handbook (1998).

Quadro 4 – Dimensões e pesos da amostra de cilindros fundidos em máquina horizontal

Material	Peso [kg]	Diâmetro da mesa [mm]	Comprimento da mesa [mm]
Aço rápido	de 7140 a 18000	de 585 a 735	de 1845 a 3000
Aço alto cromo	de 1700 a 16000	de 605 a 730	de 1835 a 3000
Ferro fundido nodular	de 5040 a 18700	de 450 a 870	de 265 a 7835

4.1 Análise de forças e momentos

Como visto anteriormente na seção 3.2, nas máquinas centrífugas verticais, toda a carga dinâmica existente no eixo vertical é suportada por rolamentos de apoio, que giram na rotação de trabalho da centrífuga.

Como visto na Equação 14, a capacidade de carga da máquina é uma razão exponencial dependente da capacidade de carga dos rolamentos, da vida desejada para os rolamentos, da rotação e do tipo de rolamento.

A Tabela 1 traz dados de pesos e rotação admissíveis para dois modelos de máquinas centrífugas verticais, modelo AS e modelo VS, que foram plotados nas Figuras 15 e 16. Pode-se verificar que a curva das máquinas realmente é uma exponencial.

Tabela 1 - Rotação e pesos admissíveis para dois modelos de máquina de fundição centrífuga vertical (ASM Handbook Vol.15, 1998, p. 658).

Rotação <i>versus</i> Peso		
Rotação [rpm]	Peso [kg]	Peso [kg]
	Modelo AS	Modelo VS
100	6930	21260
200	6930	17275
300	6130	15355
400	5620	14025
500	5260	13140
600	4980	12400
700	4755	11810
800	4570	11370
900	4410	11075
1000	4270	10690
1100	4150	
1200	4045	
1300	3950	-
1400	3860	
1450	3825	

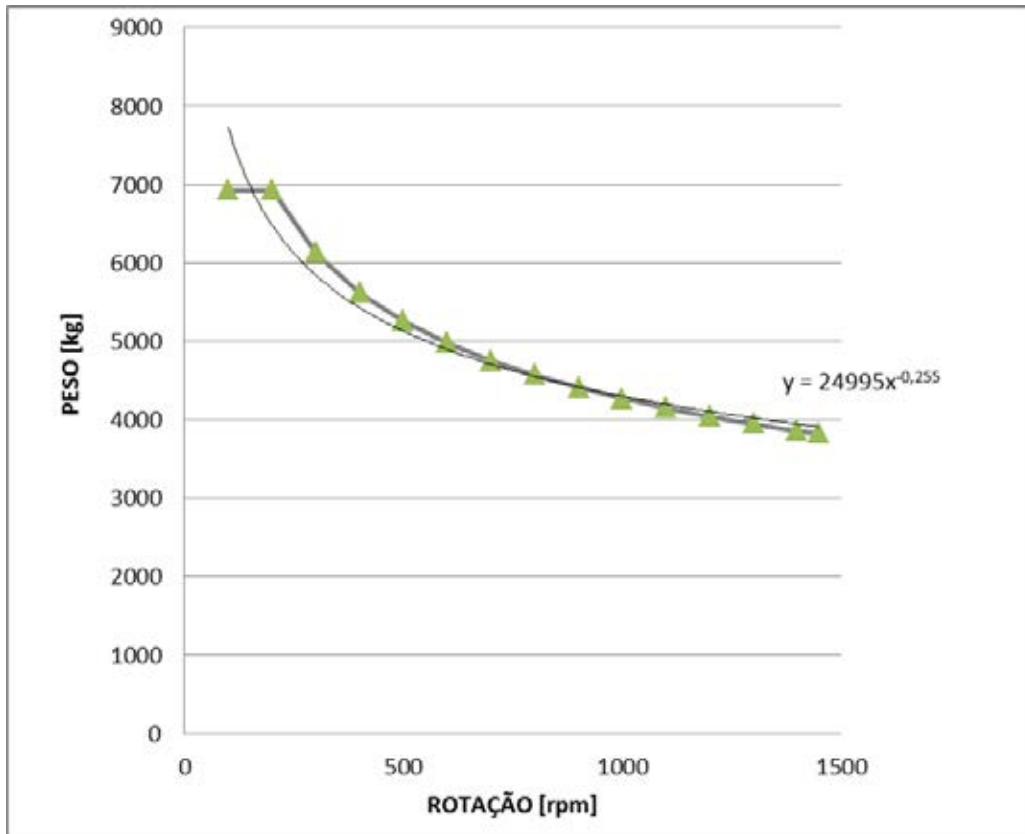


Figura 15 - Envelope de carga para máquina centrífuga vertical modelo AS.

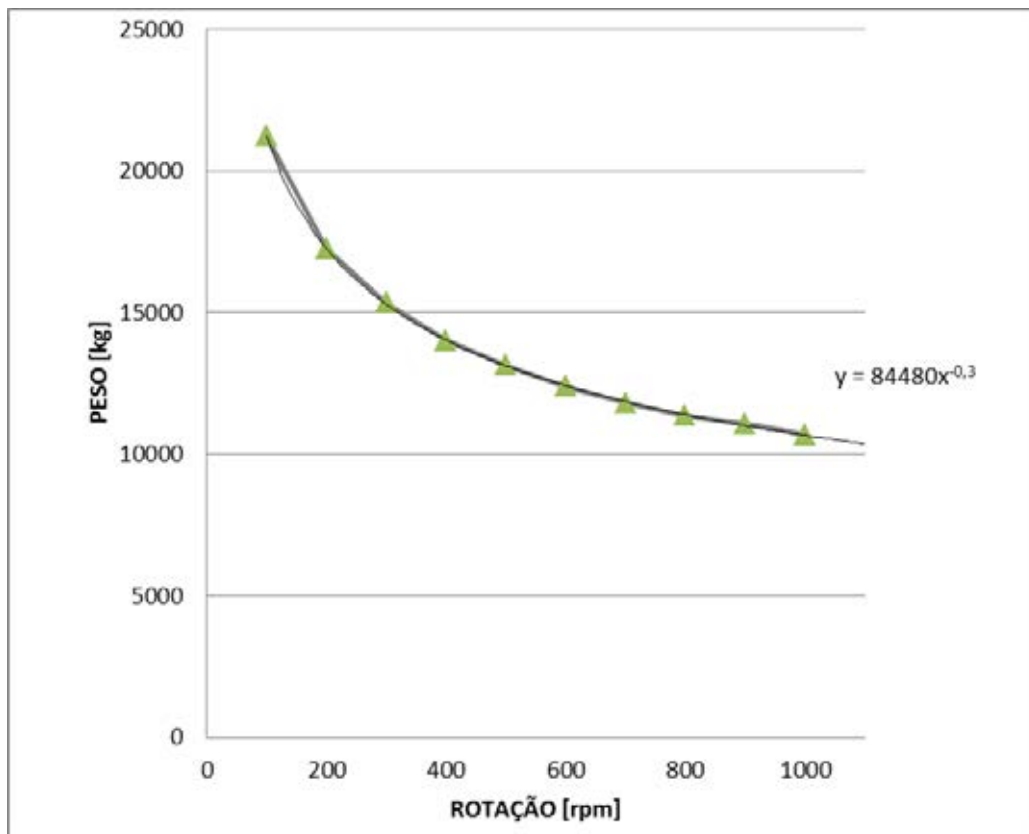


Figura 16 - Envelope de carga para máquina centrífuga vertical modelo VS.

Como mostra a Figura 15, a equação que se aproxima aos pontos plotados do envelope de carga da máquina centrífuga vertical AS, quando comparada com a Equação 14, traz o resultado do parâmetro “ p ”, que é indicado pelo fabricante do rolamento utilizado na máquina.

Para a máquina centrífuga vertical AS, o parâmetro “ p ” é igual a 0,255. Analisando os catálogos de fabricantes de rolamentos, verifica-se que este parâmetro possui valor próximo ao valor indicado como referência para rolamentos autocompensadores de rolos (0,33).

Fato semelhante ocorre com a máquina centrífuga vertical VS, cujo envelope de carga está na Figura 16. Para esta máquina, o valor do parâmetro “ p ” é 0,3, sendo ainda mais próximo ao valor de referência.

4.2 Análise da rotação e aceleração

Como dito anteriormente na seção 3.1, a rotação é uma variável dinâmica fundamental no processo de fundição, pois tem relação direta com a relação G imprimida no produto a ser centrifugado, e conseqüentemente com o valor da relação entre a força centrífuga e a força gravitacional utilizada para a centrifugação. Em baixa rotação, ocorrerá escorregamento de metal. Em rotação excessiva, são introduzidos defeitos na peça final.

Na Figura 17, são plotados os pontos das amostras boas analisadas, mostrando as faixas de rotação com relação ao peso dos cilindros. Podem-se observar dois grupos de pontos nos três materiais estudados: entre 660 e 720 rpm os pesos variam de 6 a 12 toneladas, entre 725 e 850 rpm, de 10 a 18 toneladas.

Observa-se também que as amostras de ferro fundido são as que mais se situam fora dos dois grandes grupos de pontos. Isto é causado pela grande gama de ligas de ferro fundido analisadas, como ferro fundido com alto teor de Cobalto e ferro fundido com alto teor de Enxofre, que são ligas patentes de Villares Rolls.

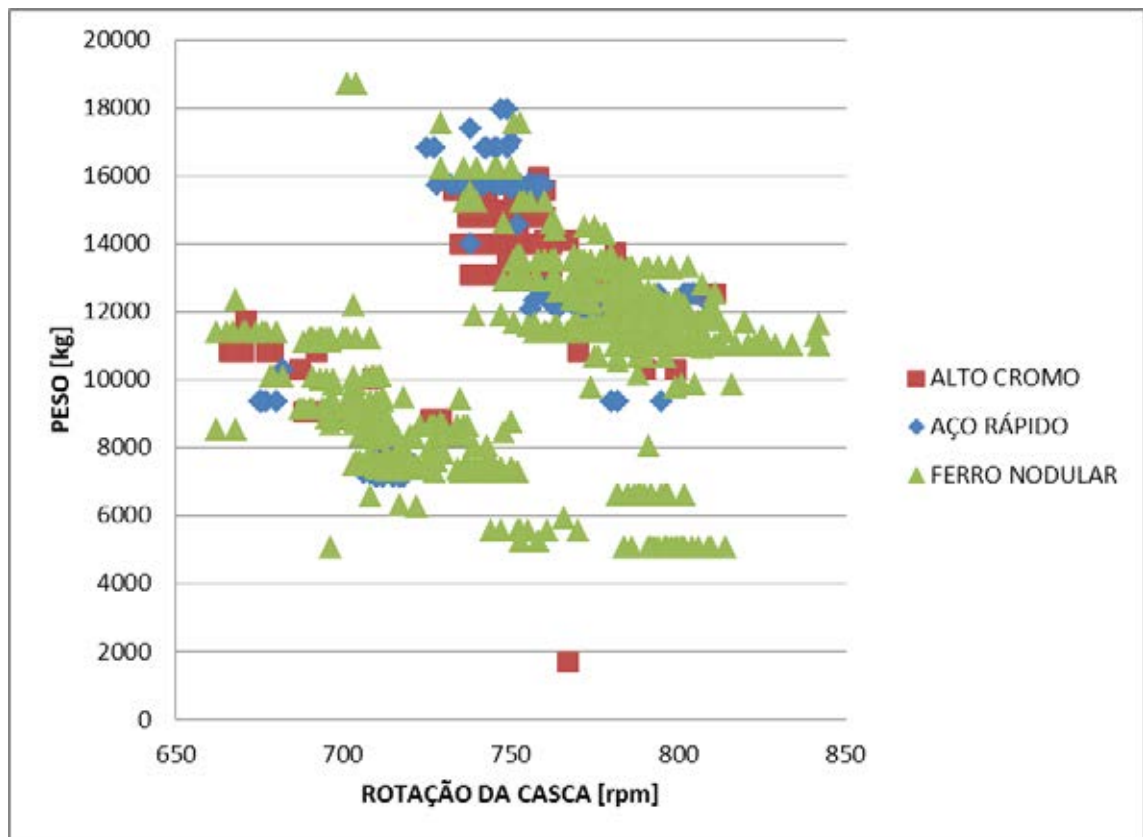


Figura 17 - Faixas de rotação *versus* peso dos cilindros da amostra boa, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.

Na Figura 18 são plotadas as mesmas faixas de rotação com relação ao peso dos cilindros, para a amostra de cilindros sucateados. A amostra de sucateamento é composta por cilindros dos três materiais (ferro fundido, aço rápido e aço alto cromo).

O sucateamento ocorre em qualquer faixa de rotação e peso. Os pontos apresentados não estão fora dos dois grupos vistos na amostra de cilindros bons (Figura 17), indicando possivelmente que a causa do sucateamento não está na adoção de um valor de rotação errada na fundição centrífuga.

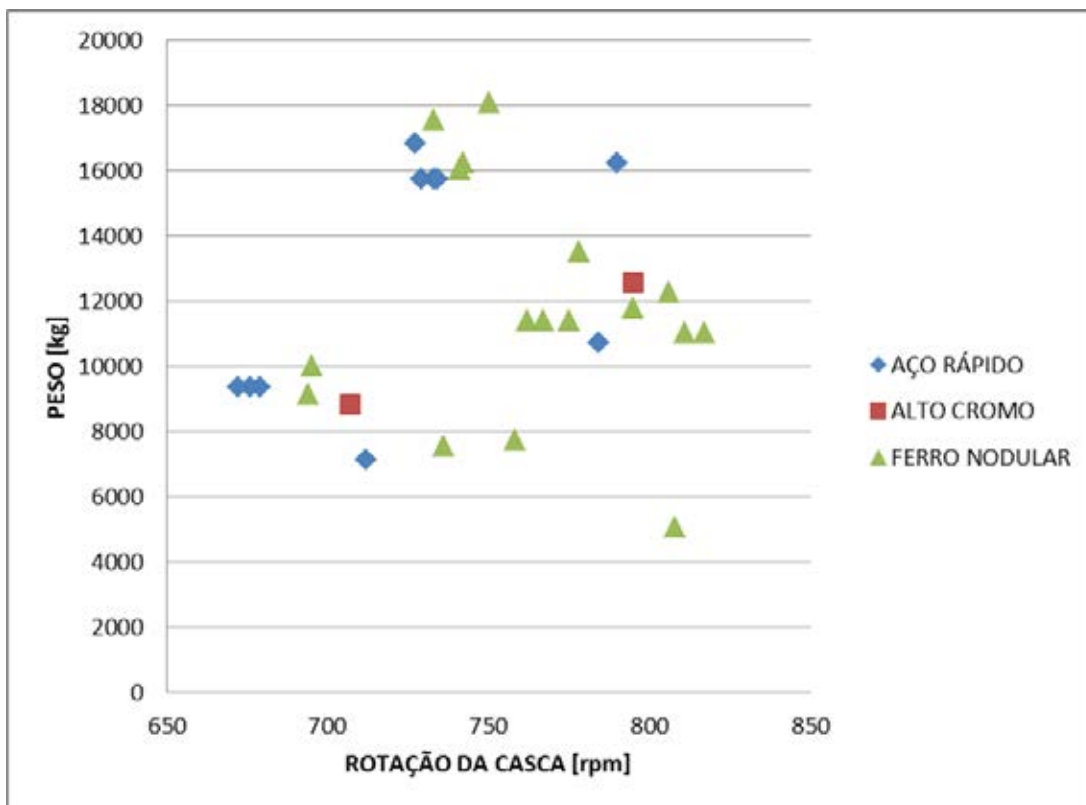


Figura 18 - Faixas de rotação *versus* peso dos cilindros da amostra sucateada, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.

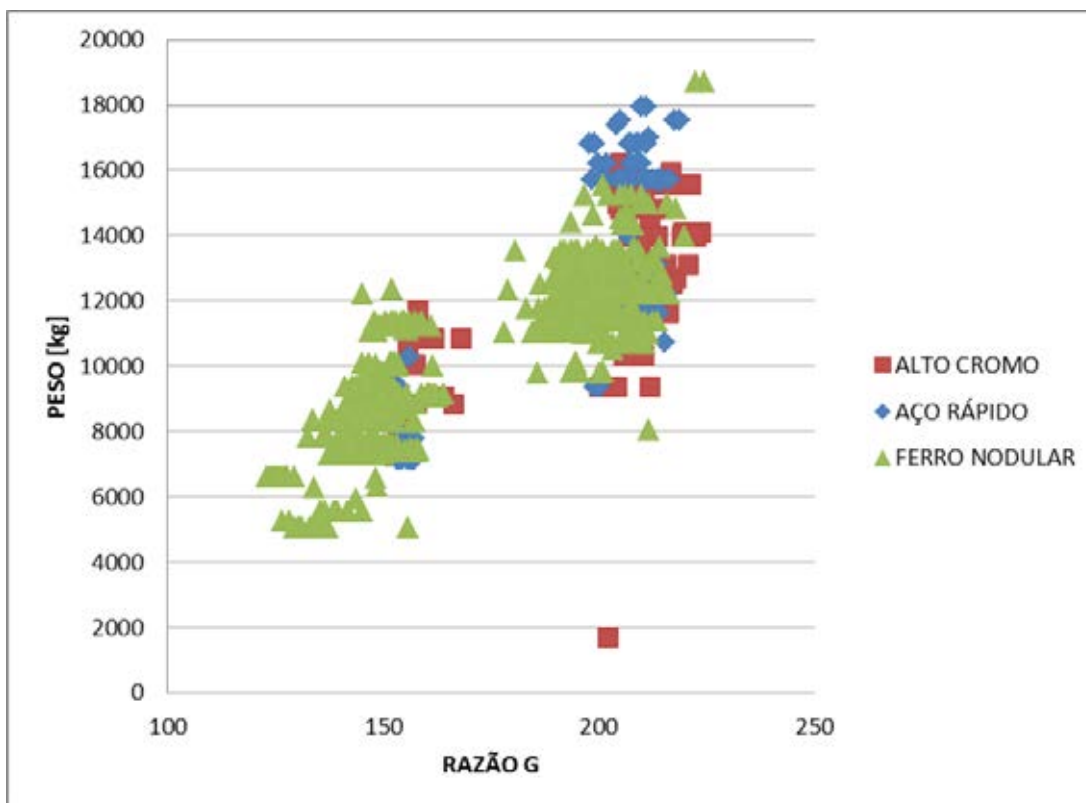


Figura 19 - Faixas da razão G *versus* peso dos cilindros da amostra boa, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.

Outro parâmetro importante é a razão G. A razão G é uma variável dependente da rotação e do raio da peça a ser produzida, como mostra a Equação 7.

Na Figura 19, é plotada a razão G *versus* o peso dos cilindros da amostra boa analisada. Assim como na Figura 17, são observados dois grupos de pontos nos três materiais estudados: entre 4 e 12 toneladas, a razão G varia de 120 a 160, entre 10 e 18 toneladas, a razão G varia de 160 a 220.

Para a amostra de cilindros sucateados, plotados na Figura 20, assim como foi verificado nas faixas de rotação com relação ao peso dos cilindros, os pontos apresentados não estão fora dos dois grupos vistos na amostra de cilindros bons (Figura 19), indicando possivelmente que a causa do sucateamento não está na adoção de um valor de razão G errado na fundição centrífuga.

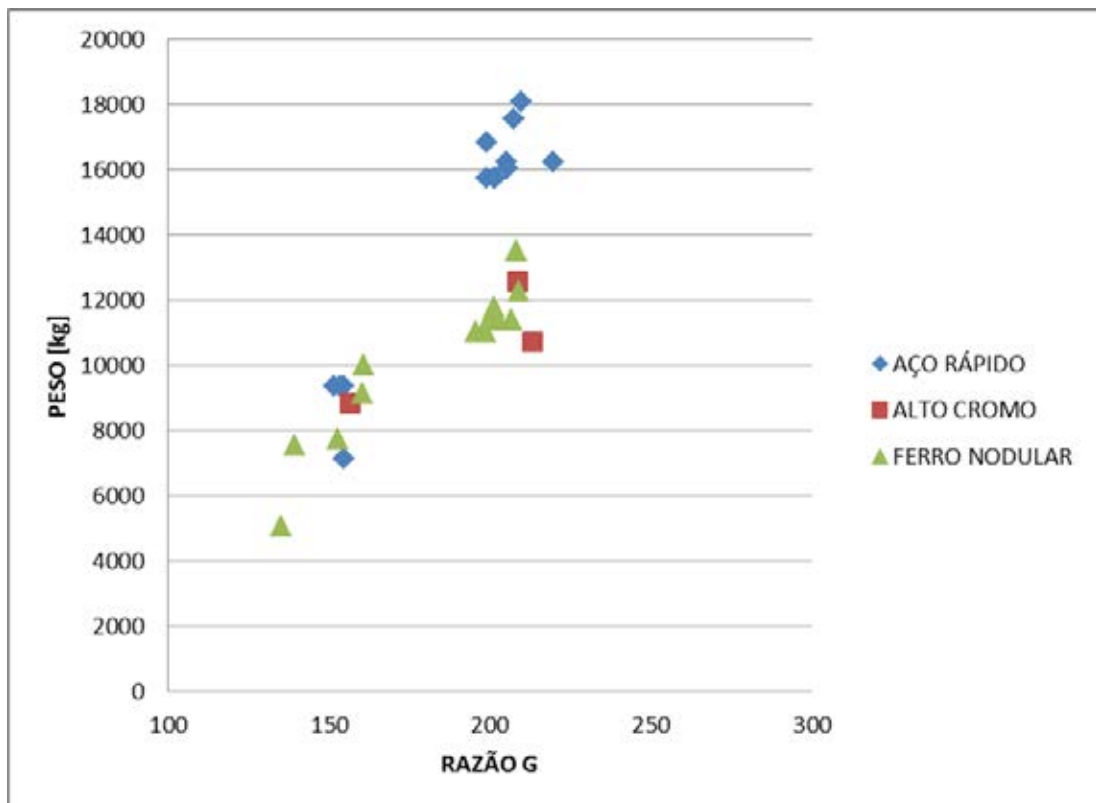


Figura 20 - Faixas da razão G *versus* peso dos cilindros da amostra sucateada, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.

4.3 Análise da trajetória do metal

Como visto na seção 3.3, o mecanismo do escoamento e trajetória do metal na fundição centrífuga, e o funcionamento dos diversos parâmetros e a correlação destes com as técnicas para fundição centrífuga não são abundantes na literatura. Dada a dificuldade de experimentação, a maior parte dos estudos é feita com líquidos como água e óleos minerais e o funcionamento é extrapolado para o caso de metais fundidos.

Porém, visto que os fatores geométricos e rotação do molde são de extrema importância no mecanismo de centrifugação, a Figura 21 traz os valores de rotação para a faixa de diâmetros estudada, para a amostra de cilindros bons.

Os aspectos geométricos estão interligados ao peso do metal fundido, pois quanto maior o diâmetro da casca, maior o peso do cilindro fundido. Desta forma, as relações entre diâmetro da casca e rotação da casca também mostram a predominância de dois grupos de pontos nos três materiais estudados: entre 660 e 800 rpm os diâmetros da casca variam de 350 a 600 mm, entre 500 e 700 rpm, de 500 e 700 mm.

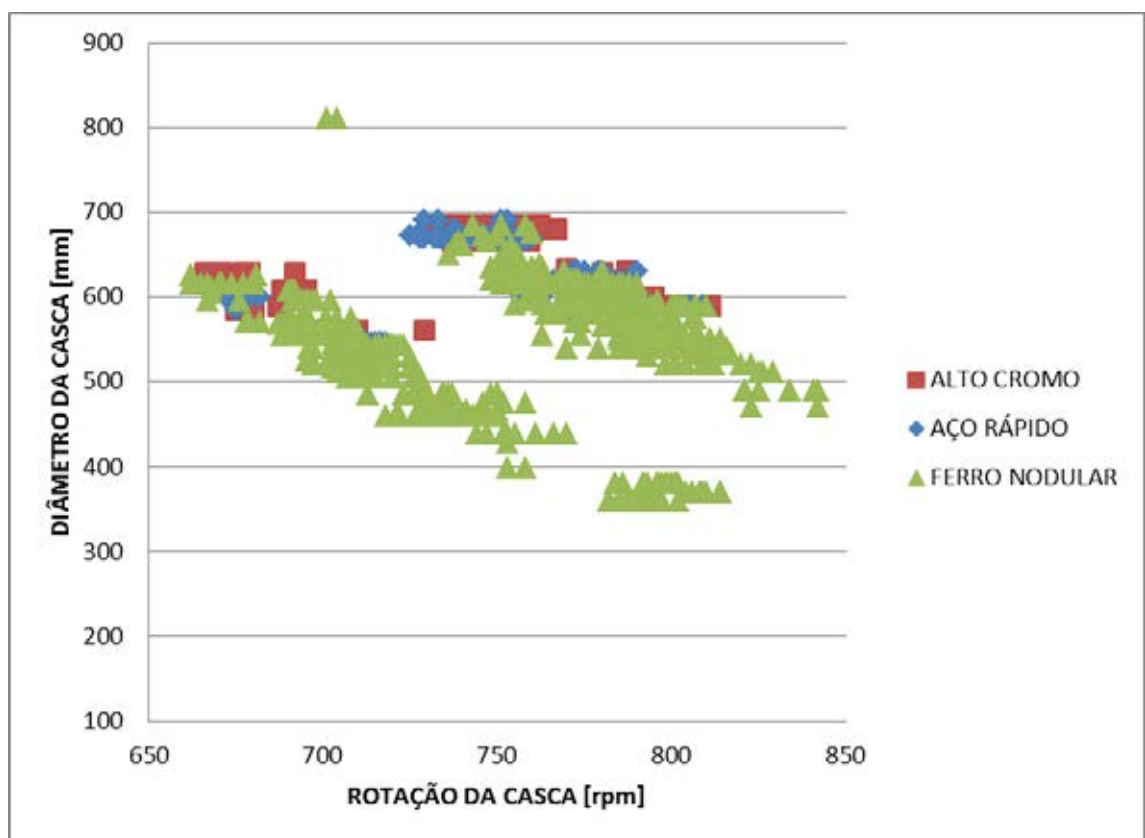


Figura 21 - Rotação da casca *versus* diâmetro da casca dos cilindros da amostra boa, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.

Para a amostra de cilindros sucateados, mostrados na Figura 22, os pontos apresentados não estão fora dos dois grupos vistos na amostra de cilindros bons (Figura 21), indicando possivelmente que a causa do sucateamento não está na adoção de um valor de rotação da casca errada na fundição centrífuga.

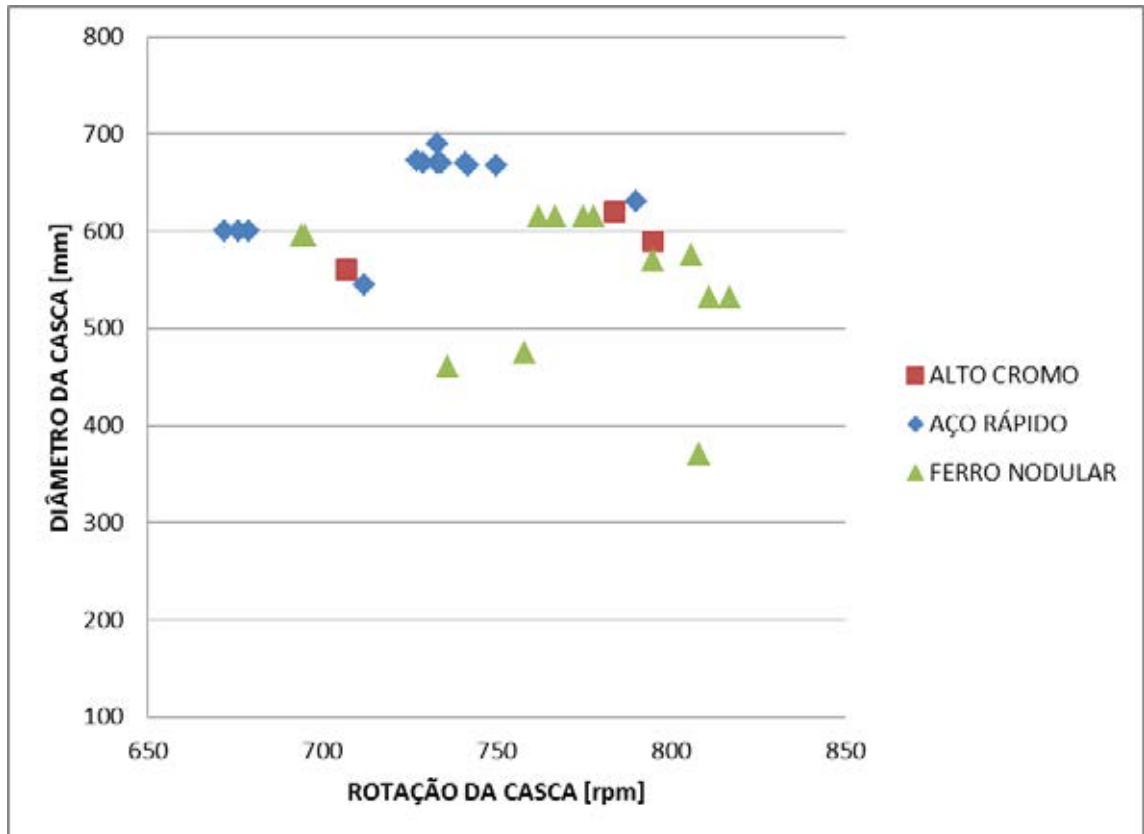


Figura 22 - Rotação da casca *versus* diâmetro da casca dos cilindros da amostra sucateada, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.

Em termos de aspecto geométrico, uma relação importante é a razão do comprimento pelo diâmetro do material centrifugado (“*Aspect ratio*” L/D), visto na seção 3.3. Cilindros com baixo L/D tendem a ser mais influenciados pelo escoamento de Ekman ao longo de todo o comprimento. Com o aumento de L/D, o efeito do escoamento de Ekman tende a diminuir.

Na Figura 23, para a amostra de cilindros bons, observa-se que para os três materiais estudados, quanto maior a razão L/D, maior a rotação utilizada na fundição centrífuga.

Porém, pelo mostrado na Figura 24, se conclui que esta relação de L/D e rotação não é a causa de sucateamento das amostras dos cilindros sucateados.

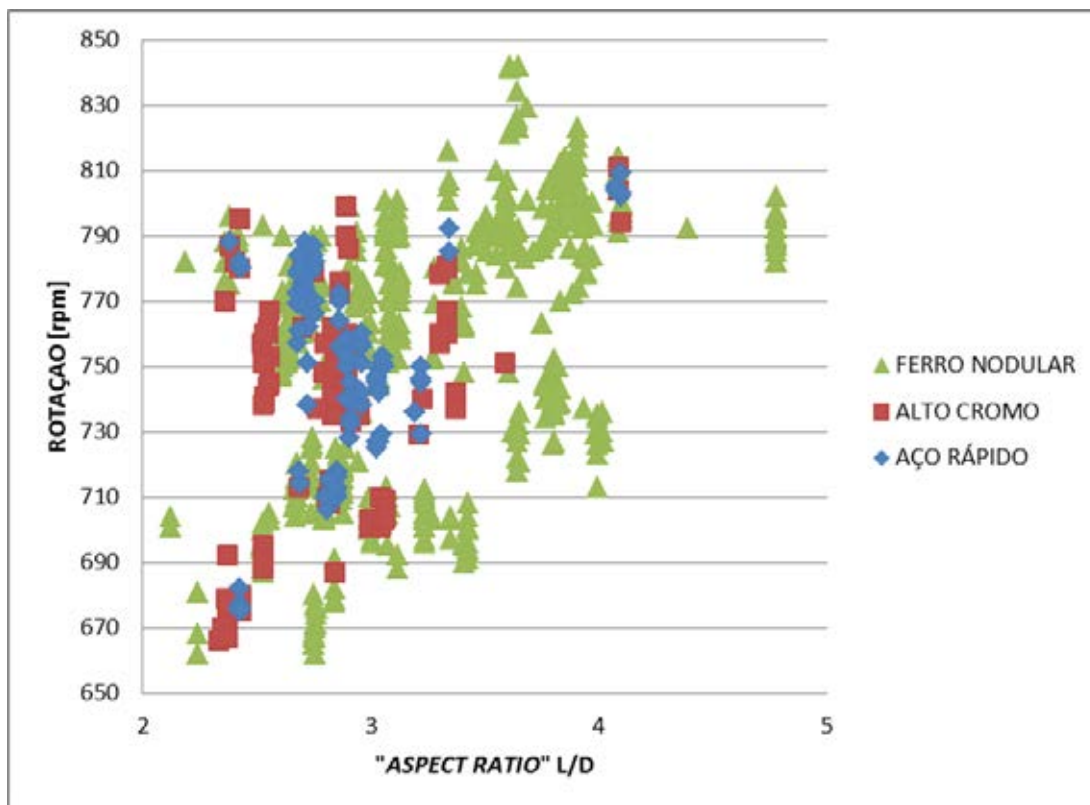


Figura 23 - "Aspect Ratio" L/D versus rotação dos cilindros da amostra boa, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.

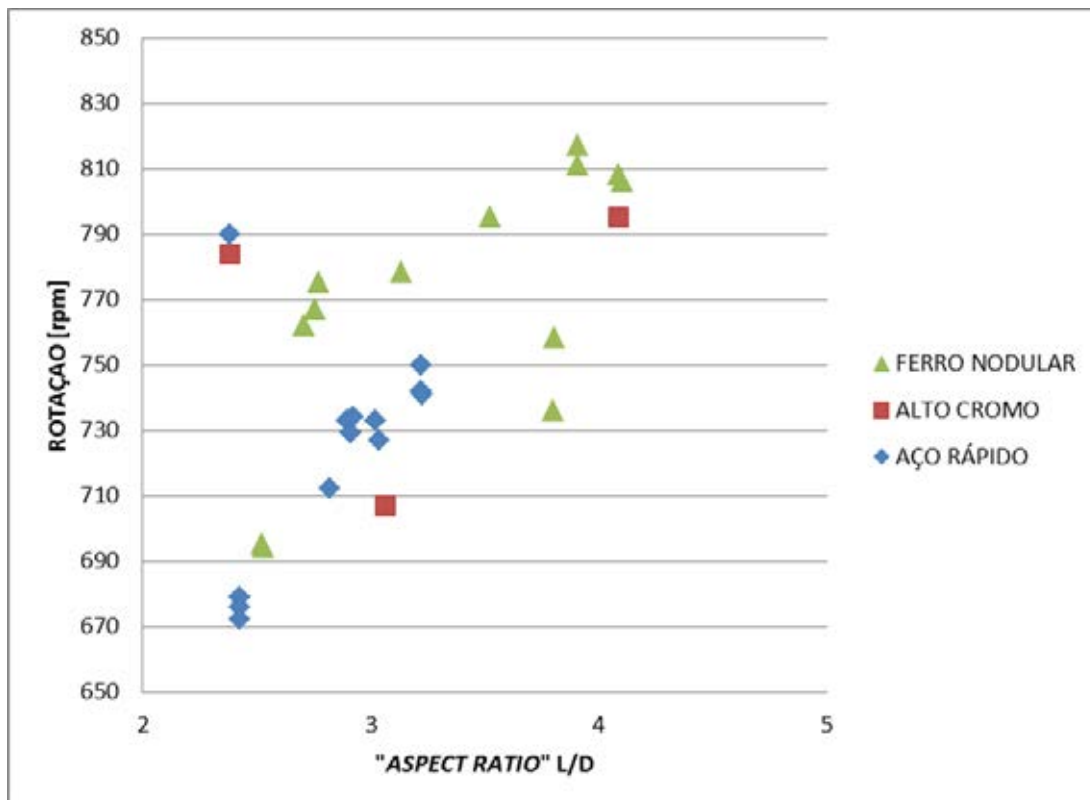


Figura 24 - "Aspect Ratio" L/D versus rotação dos cilindros da amostra sucateada, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.

Para os cilindros de ferro fundido, aço rápido e aço alto cromo estudados, diferentemente do observado por Prasad (2010), em sua experiência com liga de alumínio fundida, a rotação necessária para a formação do cilindro fundido aumenta com o aumento da espessura da casca.

Tal fato é evidenciado na Figura 25, onde se observa que para espessuras menores, de 70 a 85 mm, a faixa de rotação tem uma tendência para valores entre 670 e 750 rpm. Já para as espessuras maiores, de 100 a 120 mm, a faixa de rotação tende a subir para valores acima de 770 rpm.

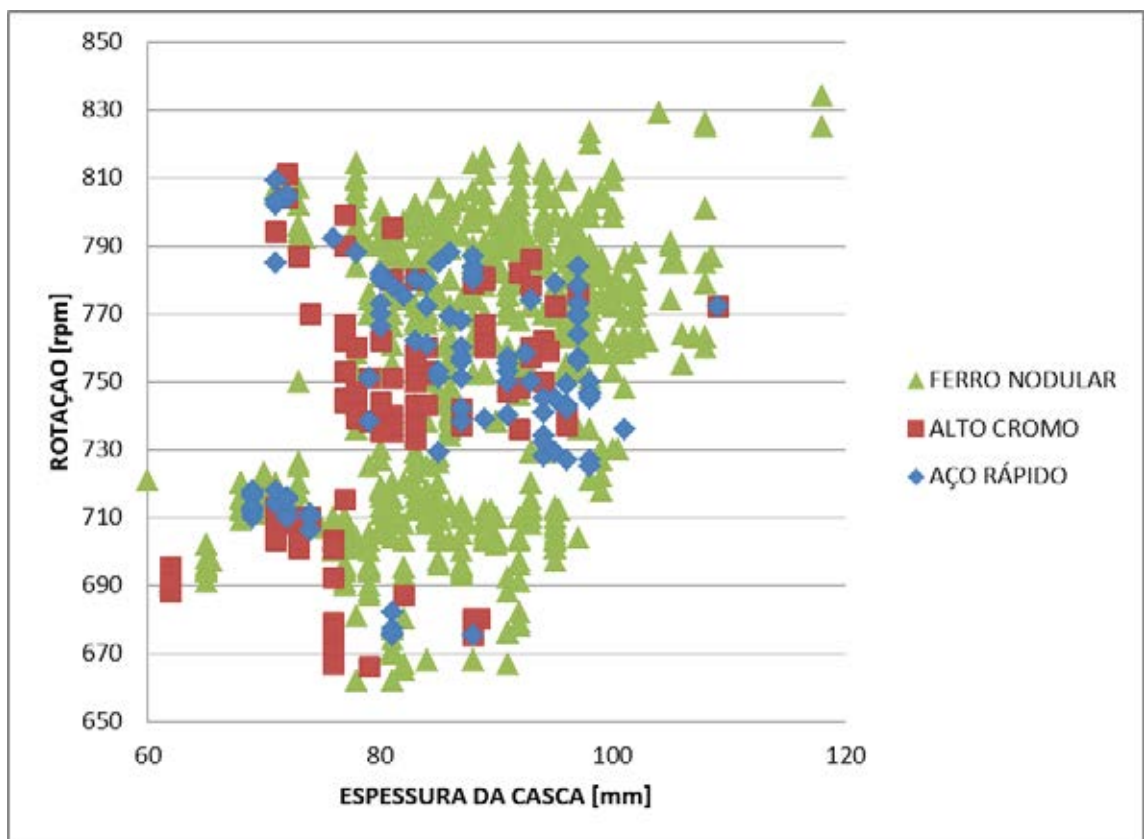


Figura 25 - Espessura da casca *versus* rotação dos cilindros da amostra boa, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.

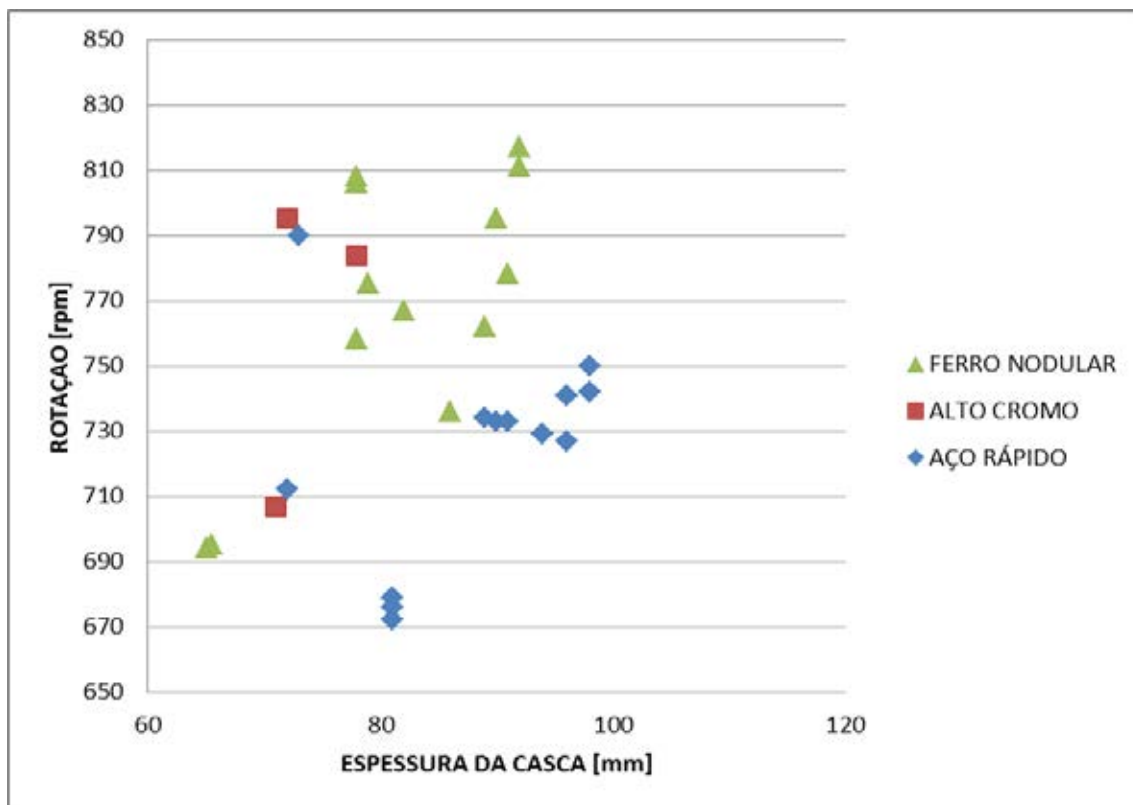


Figura 26 - Espessura da casca *versus* rotação dos cilindros da amostra sucateada, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.

Avaliando o aumento da rotação em função da espessura da casca dos cilindros, para a amostra de cilindros sucateados, não se observam discrepâncias nos valores de rotação adotados. Portanto, conclui-se que a causa do sucateamento não está na adoção de um valor errado de rotação na fundição centrífuga.

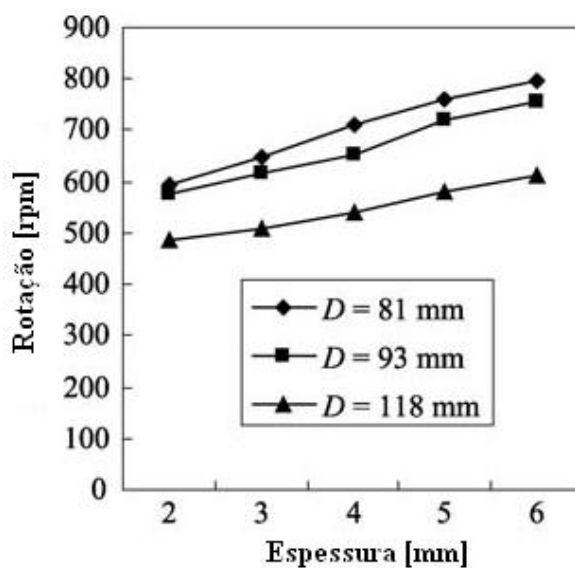


Figura 27 - Efeito do diâmetro na rotação de formação do cilindro, para amostras alumínio de mesmo comprimento (Prasad, 2009, p. 108).

Uma outra análise feita por Prasad (2010), em sua experiência com liga de alumínio fundida, compara da rotação de formação de cilindros de mesmo diâmetro e comprimento, para várias espessuras (vide Figura 27). Pode-se ver que tanto o aumento do diâmetro como o da espessura, demandam maior rotação de formação do cilindro.

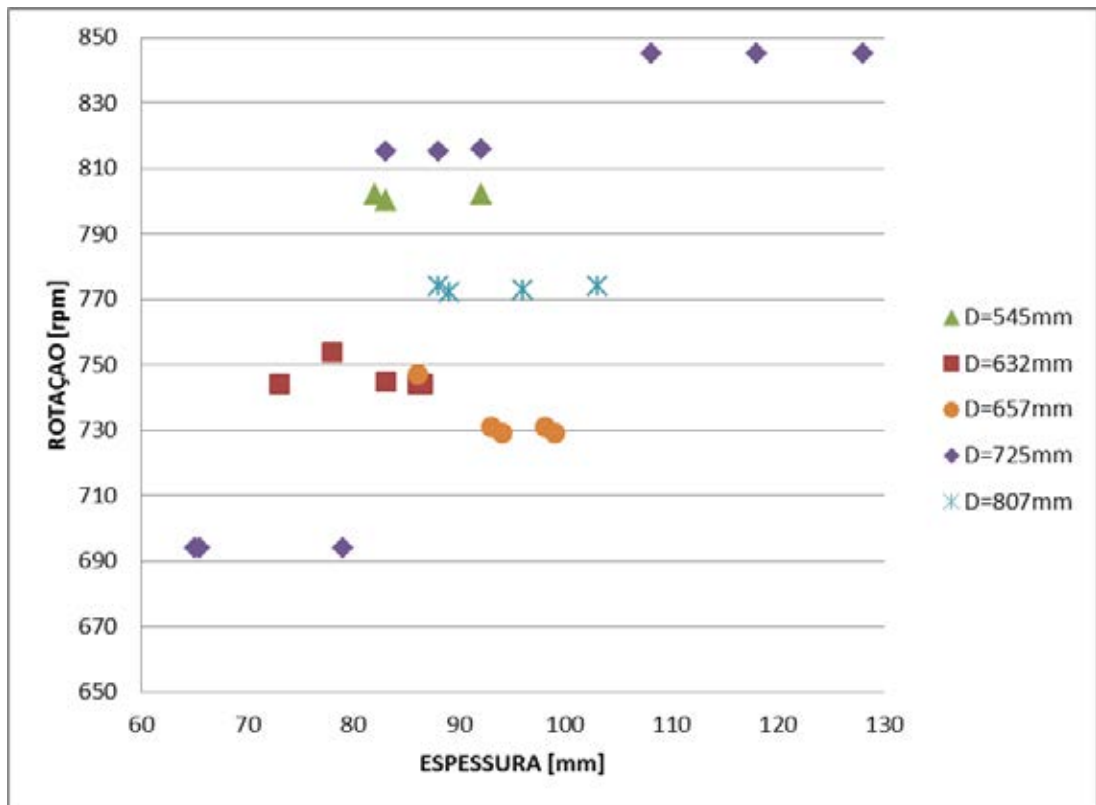


Figura 28 - Efeito do diâmetro na rotação de formação do cilindro, para amostras boas de ferro fundido nodular de mesmo comprimento.

Para cilindros de ferro fundido, como mostra a Figura 28, observa-se que o aumento da espessura demanda maior rotação de formação do cilindro, o que já tinha sido observado anteriormente, na Figura 25. Porém, o comportamento da rotação de formação dos cilindros com relação ao diâmetro a ser centrifugado é diferente do observado para o caso do alumínio. O aumento da rotação não apresenta relação com o aumento do diâmetro.

Para finalizar uma análise do aspecto geométrico e sua influência na rotação de formação dos cilindros, Prasad (2010) avaliou a influência do diferencial do comprimento no diferencial de rotação. Como visto na Figura 23, quanto maior a razão L/D, maior a rotação utilizada na fundição centrífuga. Portanto, para um mesmo

diâmetro, o efeito do aumento do comprimento é um aumento na rotação de formação do cilindro, como pode ser visto na Figura 29, para o caso do alumínio.

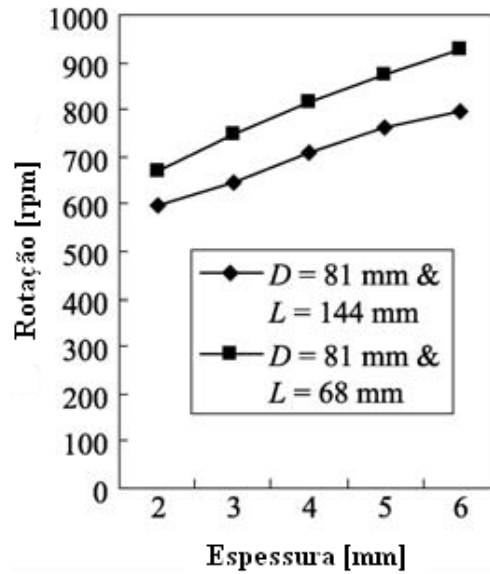


Figura 29 - Formação do cilindro de alumínio de diâmetro 81 mm para diferentes comprimentos (efeito do fluxo de Ekman na rotação de formação) (Prasad, 2009, p. 108).

Tal fato também pode ser observado para o ferro fundido, na Figura 29.

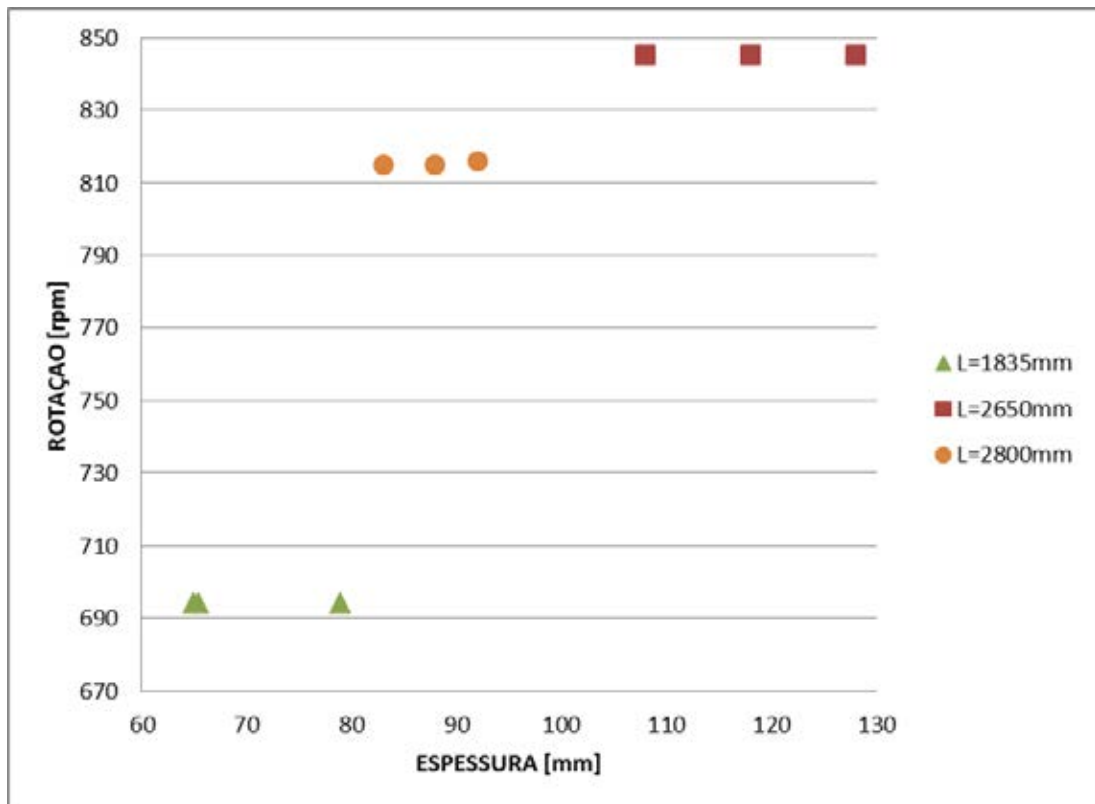


Figura 30 - Formação do cilindro de ferro fundido nodular de diâmetro 725 mm para diferentes comprimentos, para amostras boas (efeito do fluxo de Ekman na rotação de formação).

4.4 Análise da instabilidade na centrifugação

Como visto na seção 3.4, a aceleração e/ou a desaceleração angular a que é submetido o recipiente e o material centrifugado (*spin-up*, no caso de aceleração ou *spin-down*, no caso de desaceleração) são de extrema importância na formação da casca fundida.

Além disto, a forma com que o *spin-up* e o *spin-down* são conduzidos afetam a estabilidade de todo o conjunto, influenciando na deposição de material para a formação de casca e na vibração de todo o conjunto. Os dados existentes para elaboração desta análise não são suficientes para uma avaliação do quão correto estão os tempos de aceleração e desaceleração da máquina, de forma a estabelecer um ciclo de rotação indicado para cada material estudado (vide Figura 8).

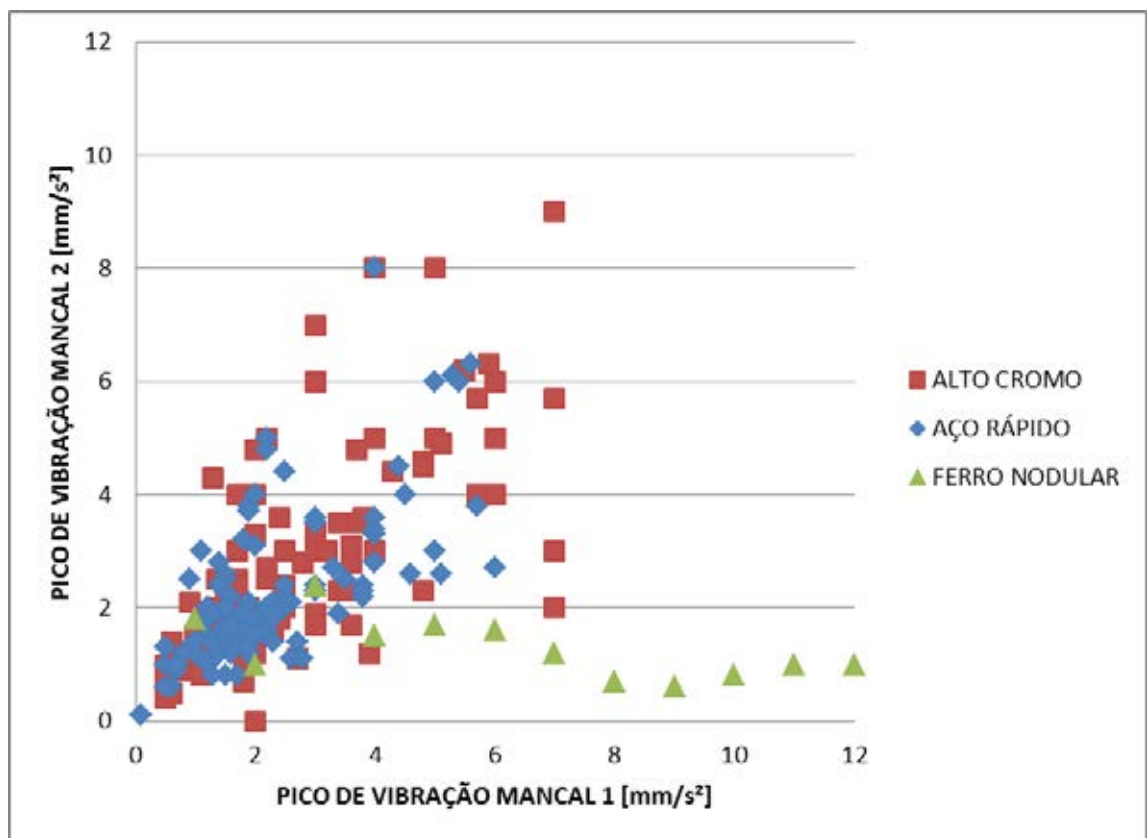


Figura 31 - Picos de vibração no mancal 1 *versus* mancal 2 dos cilindros da amostra boa, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.

No entanto, do conjunto de dados provenientes dos sensores instalados nos dois mancais da máquina centrífuga horizontal estudada, foi elaborada a Figura 31. São

observados picos de vibração no mancal 1 para os cilindros de ferro fundido nodular, diferentemente dos cilindros de aço alto cromo, que apresentam tendência de picos maiores de vibração no mancal 2.

Através de análise em campo, se constata que o aumento de vibração em apenas um mancal deve-se a folgas excessivas entre os componentes do molde, que são montados por parafusos e ajustados com pouca interferência.

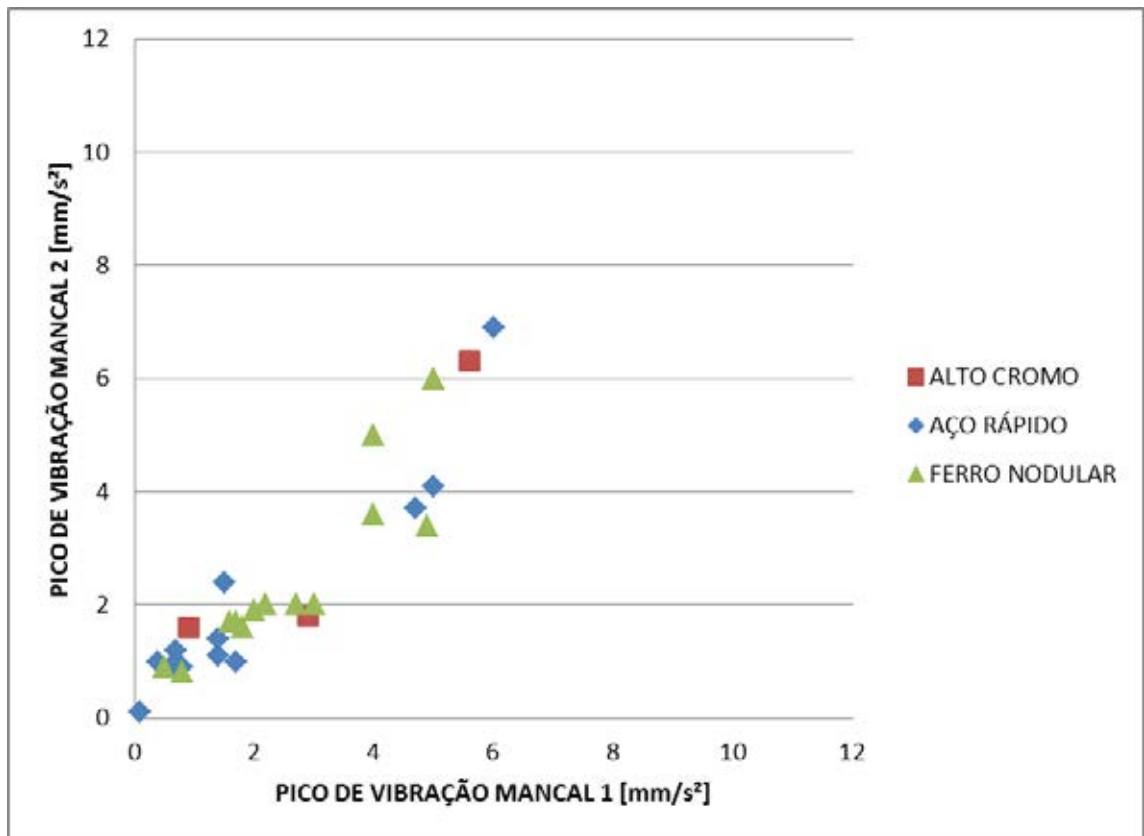


Figura 32 - Picos de vibração no mancal 1 *versus* mancal 2 dos cilindros da amostra sucateada, para aço rápido, aço alto cromo e ferro fundido nodular.

Na Figura 32, os mesmos picos de vibração estão plotados para a amostra de cilindros sucateados. Pode-se ver que, para os cilindros sucateados de ferro fundido, não houve os mesmos picos de vibração no mancal 1. Dessa forma, conclui-se que mesmo para tais níveis de vibração, não há sucateamento dos cilindros.

Talvez, por razão de não haver sucateamento, a questão da diferença de nível de vibração entre os mancais e a montagem do ferramental para cilindros de ferro fundido não seja mais explorada em campo.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Através do envelope de carga de duas máquinas centrífugas verticais existentes na literatura (modelos AS e VS), foi possível verificar o parâmetro “ p ”, dado pelo fabricante do rolamento para indicar o tipo de rolamento e utilizado para cálculo da vida do mesmo e para cálculo da vida da máquina. Através de uma equação aproximada obtida pelos pontos do envelope de carga, foi possível verificar que o rolamento utilizado nas duas centrífugas é do tipo autocompensador de rolos, cujo valor indicado como referência para o parâmetro “ p ” é igual a 0,33.

Atualmente no Brasil não temos em operação uma máquina centrífuga vertical de grande porte. A Villares Rolls possui um equipamento deste, porém ainda não está em operação. Estima-se que a vida útil dos rolamentos de apoio utilizados na máquina centrífuga vertical seria de aproximadamente 2 anos, dependendo do ritmo de produção da mesma.

Nas Figuras 17 e 18, foi visto que os pesos e rotações de centrifugação dos cilindros analisados se apresentam em dois grupos de pontos e que o sucateamento ocorre em qualquer faixa de rotação e peso.

Com relação a razão G versus o peso dos cilindros, foi observado que a amostra analisada também se divide em dois grupos de pontos. A causa do sucateamento não está na adoção de um valor de razão G errado na fundição centrífuga.

Como os aspectos geométricos estão interligados ao peso do metal fundido, as relações entre diâmetro da casca e rotação da casca também mostraram a predominância dois grupos de pontos nos três materiais estudados. A causa do sucateamento não está na adoção de um valor de rotação da casca errada na fundição centrífuga.

Com relação a razão L/D , na Figura 23 é mostrado que quanto maior a razão L/D , maior a rotação utilizada na fundição centrífuga. Porém, a relação de L/D e rotação não foram identificadas como a causa de sucateamento das amostras dos cilindros sucateados.

Para os cilindros de ferro fundido, aço rápido e aço alto cromo estudados, diferentemente do observado por Prasad (2010), em sua experiência com liga fundida

de alumínio, a rotação necessária para a formação do cilindro fundido aumenta com o aumento da espessura da casca. Através da análise da amostra de cilindros sucateados, verifica-se que a causa do sucateamento não está na adoção de um valor de rotação errada na fundição centrífuga.

Para os cilindros de ferro fundido, verificou-se que quanto maior a razão L/D , maior a rotação utilizada na fundição centrífuga. Porém, tal fato está ligado ao aumento do comprimento avaliado para um mesmo diâmetro de cilindro. O aumento de rotação não tem relação com o aumento de diâmetro.

Em termos de estabilidade na centrifugação, a amostragem existente não permitiu a de um ciclo de rotação indicado para cada material estudado, de forma a avaliar o comportamento do *spin-up* e *spin-down* do processo. Dessa forma, foi analisado apenas o comportamento da amplitude da vibração existente nos dois mancais da máquina centrífuga horizontal estudada.

Para o caso dos cilindros de ferro fundido nodular, verificou-se grandes picos de vibração no mancal 2, o que pode estar ligado a um erro de montagem dos componentes do molde. Entretanto, verificou-se que o sucateamento dos cilindros não ocorreu nos momentos de elevação destes picos de vibração.

6 CONCLUSÃO

A análise das variáveis envolvidas no dimensionamento dos rolamentos de uma máquina centrífuga vertical é tema muito complexo, que poderia ser melhormente explorado através da confecção de uma máquina centrífuga em escala reduzida. Por ser uma tecnologia de projeto e fabricação de equipamento não muito difundida, pode propiciar ainda muitos trabalhos futuros e desenvolvimento de processos e produtos.

Com relação ao estudo das amostras de cilindros fundidos em máquina centrífuga horizontal, os gráficos, apresentados no capítulo 4 deste trabalho, são enriquecedores pelo fato de existirem poucos trabalhos dedicados a estudar variáveis dinâmicas num processo metalúrgico.

As faixas de rotação utilizadas e sua relação ao peso dos cilindros e diâmetro de casca, assim como as faixas da razão G e sua relação com o peso dos cilindros são conhecimentos básicos de processo de fundição centrífuga. Um estudo mais aprofundado dessas variáveis básicas para o estudo da trajetória de materiais utilizados como ferro fundido, aço rápido e aço alto cromo, através de software de simulação numérica como volumes finitos pode trazer uma grande riqueza de detalhes de conhecimento de processo e incrementar melhorias na área.

Poderiam ser tratados, por exemplo, através deste modelo matemático, questões como influência de geometria do molde nas variáveis de processo, viscosidade do metal fundido, transferência de calor e solidificação.

Em se falando de trajetória do metal, caberia também um estudo direcionado de ciclo de rotação por tipo de material e geometria do molde. Desta forma, se conseguiria explicar um pouco mais os fenômenos de instabilidade ocorridos durante a centrifugação, que tem influência direta nos defeitos introduzidos no produto final e na razão da ocorrência de sucateamento.

Através da instrumentação de uma máquina centrífuga em escala reduzida, poderiam ser obtidos dados mais precisos e até mesmo confiáveis, para validar um modelo numérico de software de simulação.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **ASM Handbook Vol.14: Forming and Forging**. 9th. ed.: ASM, 1998. 2110p.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **ASM Handbook Vol.15: Casting**. 9th. ed.: ASM, 1998. 2002p.

HANGUANG, F.; QIANG, X.; JIANDONG, X. A study of segregation mechanism in centrifugal cast high speed steel rolls. **Material Science and Engineering**, EUA, A479, p. 253-260, 2008. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/msea>>. Acesso em: 23 ago. 2010.

HANGUANG, F.; QIANG, X.; JIANDONG, X. A study on the crack control of a high-speed steel roll fabricated by a centrifugal casting technique. **Material Science and Engineering**, EUA, A474, p. 82-87, 2008. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/msea>>. Acesso em: 23 ago. 2010.

HANGUANG, F.; CHENG, X.; DU Z.; LEI, Y.; FENG, Z. Effect of quenching temperature on structure and properties of centrifugal casting high speed steel roll. **Research & Development**, EUA, p. 15-19, fev. 2009. Disponível em: <<http://www.rdmag.com>>. Acesso em: 10 mai. 2010.

GAO, J. W.; WANG, C. Y. Modeling the solidification of functionally graded materials by centrifugal casting. **Material Science and Engineering**, EUA, A292, p. 207-215, 2000. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/msea>>. Acesso em: 23 ago. 2010.

CHIRITA, G.; SOARES, D.; SILVA, F. S. Advantages of the centrifugal casting technique for the production of structural components with Al-Si alloys. **Materials & Design**, EUA, n° 29, p. 20-27, 2008. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/matdes>>. Acesso em: 23 ago. 2010.

SEABRA, E.; BARBOSA, J.; PUGA, H. Design and development of a centrifugal casting machine for pistons production. **International Congresso n Project Engineering**, Espanha, n° 13, p. 401-408, 2009. Disponível em: <<http://www.aepro.com>>. Acesso em: 15 fev. 2011.

CHIRITA, G.; STEFANESCU, I.; SOARES, D.; SILVA, F. S. Centrifugal versus gravity casting techniques over mechanical properties. **Anales de Mecânica de la Fractura**, Portugal, vol. 1, p. 317-322, 2006. Disponível em: <<http://www.gef.es/Congresos/23/PDF/3-12.pdfSimilares>>. Acesso em: 15 fev. 2011.

PRASAD, K. S. K.; MURALI, M. S.; MUKUNDA, P. G. **Analysis of fluid flow in centrifugal casting**. Alemanha, 2010, Disponível em: <<http://www.springerlink.com/index/50403gq20212821x.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2011.

TREVIÑO, L. E.; RODRIGUEZ, B. P.; MUÑOZ, J. G.; SIERRA, J. L. S.; SIERRA, R. S.; DÍAZ, J. J. C. Application of simulation techniques to optimize the vertical spin casting process in the manufacture of rolling mill rolls. **Conferencia de Laminación**, Argentina, n° 18, p. 334-344, 2010.

PRASAD, K. S. K.; MURALI, M. S.; MUKUNDA, P. G.; MAJUMDAR, S. Numerical simulation and cold modeling experiments on centrifugal casting. **Metallurgical and Materials Transactions B**, EUA, vol. 42B, p. 144-155, 2011.

CHIRITA, G.; STEFANESCU, I.; BARBOSA, J.; PUGA, H.; SOARES, D.; SILVA, F. S. On assessment of processing variables in vertical centrifugal casting technique. **International Journal of Cast Metals Research**, EUA, vol. 22, p. 382-

389, 2009. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/12422>>. Acesso em: 20 jul. 2011.

BENTON, E. R.; CLARK, A. Jr. Spin-up. **Annual Review of Fluid Mechanics**, EUA, p. 257-280, 1974. Disponível em: <<http://www.annualreviews.org>>. Acesso em: 24 ago. 2011.

SMIRNOV, S. A. **Stability of stratified spin-up flows**. EUA, 10 p., 2007.

DUCK, P. W.; FOSTER, M. R. Spin-up of homogeneous and stratified fluids. **Annual Review of Fluid Mechanics**, EUA, p. 231-263, 2001. Disponível em: <<http://www.annualreviews.org>>. Acesso em: 20 ago. 2011.

KERSWELL, R. R. Elliptical Instability. **Annual Review of Fluid Mechanics**, EUA, p. 83-113, 2002. Disponível em: <<http://www.annualreviews.org>>. Acesso em: 24 ago. 2011.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

THOMSON, William T. **Teoria da vibração com aplicações**. 1.ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 1978. v.1, 462p.

BEER, F. P.; JOHNSTON JÚNIOR, E. R. **Mecânica vetorial para engenheiros: cinemática e dinâmica**. 5.ed. São Paulo: Makron Books, 2004. v.1, 982p.

COLLINS, D. B.; KANE, T. K. **Sleeve Caster and Product Development**. Londres, ago. 1998. 8p.

HASHIMOTO, M.; ODA, T.; HOKIMOTO, K.; KAWAKAMI, T.; KURAHASHI, R. Development and application of high speed toll steel rolls in hot strip rolling. **Nippon Steel Technical Report**, Japão, n° 66, p. 82-90, 1995. Disponível em: < <http://www.nsc.co.jp/en/tech/report/index.html>>. Acesso em: 10 mai. 2010.

JOSHI, A. M. **Centrifugal Casting**. Bombai, 8p.

VASSILIOU, A. N.; PANTELIS, D. I.; VOSNIAKOS, C. Investigation of centrifugal casting conditions influence on part quality. **International Conference on Manufacturing Engineering**, Grécia, n° 3, p. 347-356, 2008. Disponível em: <<http://ithaki.meng.auth.gr/data/ICMEN2008PDF/04-CATIX09.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2011.

PERSSON, A. **The Coriolis Effect – a conflict between common sense and mathematics**. Suécia, 20 p.