

**UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU
EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS**

**DESENVOLVIMENTO DE LIGAS DE FERRO FUNDIDO CINZENTO
PARA A FABRICAÇÃO DE CILINDROS SECADORES UTILIZADOS
EM MÁQUINAS DE PRODUÇÃO DE PAPEL**

Autor: Amandio da Cruz Pires

Orientadora: Profa. Dra. Neide Aparecida Mariano

Co-Orientador: Prof. Dr. Marcelo Falcão de Oliveira

Itatiba-SP
2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU
EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS**

**DESENVOLVIMENTO DE LIGAS DE FERRO FUNDIDO CINZENTO
PARA A FABRICAÇÃO DE CILINDROS SECADORES UTILIZADOS
EM MÁQUINAS DE PRODUÇÃO DE PAPEL**

Amandio da Cruz Pires

Dissertação de mestrado apresentada à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade São Francisco como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais, sob a orientação da Profa. Dra. Neide A. Mariano

Itatiba-SP
2006

621.75 Pires, Amandio da Cruz.
P743d Desenvolvimento de ligas de ferro fundido cinzento para a fabricação de cilindros secadores utilizados em máquinas de produção de papel / Amandio da Cruz Pires -- Itatiba, 2006.
101 p.

Dissertação (mestrado) – Programa de Pós- Graduação Stricto Sensu em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade São Francisco.
Orientação de: Neide Aparecida Mariano.

1. Ferro fundido cinzento. 2. Condutividade térmica.
3. Máquina de produção de papel. I. Mariano, Neide Aparecida. II. Título.



**ATA DE ARGÜIÇÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DO ALUNO
AMANDIO DA CRUZ PIRES**

Aos vinte e dois do mês de fevereiro, do ano de dois mil e seis, às 10 horas, nas dependências da Universidade São Francisco, reuniu-se a Comissão da Banca Examinadora de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia e Ciência dos Materiais da USF, para avaliação do Relatório de Atividades e do Trabalho de Pesquisa “Desenvolvimento de ligas de ferro fundido cinzento para a fabricação de cilindros secadores utilizados em máquinas de produção de papel.” apresentado pelo aluno Amandio da Cruz Pires, graduado em Engenharia Metalúrgica, pela Faculdade de Engenharia Industrial - FEI, que concluiu os créditos exigidos para a obtenção do Grau de “Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais” segundo os registros constantes na Secretaria de Câmpus, Itatiba. Os trabalhos foram instalados às 10 horas pela Profa. Dra. Neide Aparecida Mariano, Orientadora do candidato e Presidente da Banca Examinadora, constituída pelos seguintes Professores: Neide Aparecida Mariano, Doutora em Engenharia Metalúrgica, pela Universidade de São Paulo - USP, Paulo Roberto Mei, Doutor em Engenharia Mecânica, pela Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP e João Batista Fogagnolo, Doutor em Engenharia Mecânica, pela Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. A Banca Examinadora tendo decidido aceitar a dissertação, passou à Argüição Pública do candidato. Encerrados os trabalhos às 12:00 horas, os examinadores, consideraram o candidato aprovado e conseqüentemente apto a receber o título de “Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais”. E, para constar, eu Profa. Dra. Neide Aparecida Mariano, lavrei a presente Ata, que assino juntamente com os demais membros da Banca Examinadora. Itatiba, 22 de fevereiro de 2006.

Prof. Dra. Neide Aparecida Mariano
Orientadora e Presidente

Prof. Dr. Paulo Roberto Mei

Prof. Dr. João Batista Fogagnolo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe Conceição, aos meus filhos Camila e Bruno na intenção de motivá-los para o futuro e a minha esposa Aldina pela dedicação, apoio e amor por todos esses anos que estamos juntos.

VITAE

Engenheiro Metalurgista pela Faculdade de Engenharia Industrial de São Bernardo do Campo – SP (1979)

AGRADECIMENTOS

À Professora Dra. Neide Aparecida Mariano e ao Professor Dr. Marcelo Falcão de Oliveira pela paciência e apoio durante a orientação deste trabalho.

A VOITH PAPER Máquinas e Equipamentos Ltda por incentivar e disponibilizar recursos para que este trabalho fosse realizado.

Aos colegas do departamento de Fundição da Voith Paper pelas contribuições dadas a esse trabalho.

Aos engenheiros Robson e Brujas do departamento de Engenharia de Cilindros e Rolos da Voith Paper pelas contribuições e discussões realizadas durante este trabalho.

**Publicações Geradas Durante o Desenvolvimento
desta Dissertação**

1- **Pires, A. C.**; Mariano, Oliveira, F. M.; Mariano, N. A. Ligas de Ferro Fundido Cinzento para Aplicação na Indústria de Papel. In: III ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU, USF, 19 de maio, 2004, Itatiba, SP, v.1, p. 35.

Resumo

Pires, A.C. *Desenvolvimento de Ligas de Ferro Fundido Cinzento para a Fabricação de Cilindros Secadores Utilizados em Máquinas de Produção de Papel*. Itatiba, 2006, 101 p. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade São Francisco.

As indústrias de produção de papel são caracterizadas pela produção em alta escala através de grandes plantas, exigindo cada vez mais o desenvolvimento de máquinas de produção de papel com maior velocidade e capazes de produzir folhas de grande largura. As máquinas de produção papel têm em média 40 a 70 cilindros secadores, geralmente de ligas de ferros fundidos cinzentos convencionais. Dessa forma, neste trabalho foram desenvolvidas, selecionadas e estudadas ligas de ferro fundido cinzento não convencional, com o objetivo de verificar a viabilidade da utilização em cilindros secadores de grande porte e comparar com a aplicação das ligas convencionais. Foram fabricados cilindros secadores em ferro fundido cinzento com 10 metros de comprimento, diâmetro de 1,8 metros e peso de 20 toneladas para as ligas atualmente usadas (ENGJL250, ENGJL300, SA278CL35, SA278CL40, SA278CL45) e para as duas ligas propostas (ENGJL350 e SA278CL50). Os resultados demonstram que as duas ligas propostas são viáveis sob os aspectos de resistência mecânica, condutividade térmica e de construção mecânica, se tornando uma solução para o uso em máquinas de produção de papel de alta velocidade e grandes comprimentos de cilindros secadores a um menor custo de produção de papel.

Palavras-chave: ferro fundido cinzento; máquinas de produção de papel; condutividade térmica.

Abstract

Pires, A. C. *Development of Gray Cast Iron Alloys for Dryer Cylinders Fabrication used in Paper Machines Production*. Itatiba, 2006, 101 p. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade São Francisco.

The paper production industries are characterized by high scale production through large plants, requiring more and more the development of paper production machines with bigger velocity and capable of producing wide sheets. The paper production machines present in average 40 to 70 dryer cylinders, generally of the conventional gray cast iron alloys. In this way, the non-conventional gray cast iron alloys were developed, selected and studied to verify the viability of using them in large dryer cylinders and compare with the conventional alloys application. The dryer cylinders in gray cast iron were produced with 10 meters of length, 1.8 meters of diameter and weighed 20 ton for the alloys used currently (ENGJL250, ENGJL300, SA278CL35, SA278CL40, SA278CL45) and for the two proposed alloys (ENGJL350 and SA278CL50). The results demonstrate that the two proposed alloys are feasible under mechanical resistance aspects, thermal conductivity and mechanical construction, becoming a solution to be used in high velocity paper production machines and great lengths of dryer cylinders with a lower production paper cost.

Key words: Grey Cast Iron; Paper Machine; Thermal Conductivity.

Sumário

Lista de Figuras.....	i
Lista de Tabelas.....	iii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos.....	v
1. Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica.....	3
2.1 Máquina de Produção de Papel.....	3
2.2 Parte Úmida da Máquina de Produção de Papel.....	3
2.3 Parte Seca da Máquina de Produção de Papel.....	5
2.3.1 Ciclos de secagem.....	6
2.3.2 Vapor para secagem de papel.....	7
2.3.3 Cilindros secadores.....	9
2.4 Seção de Acabamento.....	12
2.5 Ferro Fundido.....	14
2.5.1 Propriedades, Microestruturas e Processamento.....	14
2.5.2 Carbono Equivalente.....	19
2.5.3 As Principais Famílias de Ferros Fundidos.....	20
2.5.3.1 Ferro Fundido Cinzento.....	20
2.5.3.2 Ferro Fundido Nodular.....	21
2.5.3.3 Ferro Fundido Maleável.....	22
2.5.3.4 Ferro Fundido Branco.....	22
2.5.4 Microconstituente do Ferro Fundido Cinzento.....	23
2.5.4.1 Grafita.....	23
2.5.4.2 Perlita.....	23
2.5.4.3 Ferrita.....	24
2.5.4.4 Cementita e Steadita.....	24
2.5.5 Influência dos Principais Elementos Químicos.....	24
2.5.5.1 Carbono.....	25
2.5.5.2 Silício.....	25
2.5.5.3 Manganês.....	25
2.5.5.4 Enxofre.....	25

2.5.5.5 Fósforo.....	26
2.5.6 Inoculação.....	26
2.5.7 Influência dos Elementos de Liga.....	27
2.5.7.1 Cobre.....	28
2.5.7.2 Cromo.....	28
2.5.7.3 Níquel.....	29
2.5.7.4 Molibdênio.....	29
2.5.8 Gases no Ferro Fundido Cinzento.....	30
2.5.8.1 Nitrogênio.....	30
2.5.8.2 Hidrogênio.....	30
2.5.8.3 Oxigênio.....	31
2.5.9 Principais Propriedades dos Ferros Fundidos.....	31
2.5.9.1 Resistência à Tração.....	31
2.5.9.2 Dureza.....	33
2.5.9.3 Relação entre Dureza e Resistência à Tração.....	34
2.5.9.4 Usinabilidade.....	37
2.5.9.5 Condutividade Térmica.....	40
2.6 Processos de Fundição.....	42
2.6.1 Fusão.....	43
2.6.2 Moldagem.....	46
2.6.3 Resina Fenólica de Cura a Frio.....	48
2.6.4 Tratamentos Térmicos Utilizados.....	49
2.6.4.1 Recozimento de Alívio de Tensões.....	49
2.6.4.2 Recozimento de Amaciamento.....	50
2.6.4.3 Têmpera e Revenimento.....	50
3. Materiais e Métodos.....	51
3.1 Preparação do Metal.....	51
3.1.1 Carregamento do Forno.....	52
3.1.2 Matérias Primas Utilizadas.....	53
3.1.3 Inoculação.....	55
3.1.4 Vazamento.....	56
3.2 Processo de Moldagem de Cilindros Secadores.....	57

3.3 Determinação das Propriedades Mecânicas.....	60
3.3.1 Ensaio de Tração.....	60
3.3.2 Medidas de Dureza.....	62
3.4 Caracterização Microestrutural.....	63
3.4.1 Preparação das Amostras.....	63
3.4.2 Microscopia Ótica.....	63
3.5 Condutividade Térmica.....	63
3.6 Cálculo de Espessura do Cilindro Secador.....	64
4 Resultados e Discussões.....	66
4.1 Caracterização do Material do Cilindro Secador.....	66
4.1.1 Composição Química.....	66
4.1.2 Propriedades Mecânicas.....	68
4.1.3 Análise da Microestrutura.....	70
4.1.4 Condutividade Térmica.....	76
4.2 Espessuras de Parede dos Cilindros Secadores.....	78
5. Conclusões.....	85
6. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	86
7. Referências Bibliográficas.....	87
Anexo A.....	92

Lista de Figuras

Figura 2.1 Esquema de secagem da folha de papel.....	6
Figuras 2.2 Perfil térmico e de evaporação durante a secagem num cilindro secador.....	7
Figura 2.3 Cilindro secador.....	10
Figura 2.4 Rolo duo estabilizador.....	12
Figura 2.5 Desenho esquemático de uma máquina de produção de papel.....	13
Figura 2.6 Diagrama de equilíbrio Fe-C.....	16
Figura 2.7 Cortes do diagrama ternário Fé-C-Si com 0, 2 e 4% de Si.....	18
Figura 2.8 Dureza em relação a resistência à tração.....	37
Figura 2.9 Desenho esquemático da formação de cavacos para ferros Fundidos.....	39
Figura 2.10 Influência da perlita em ferro fundido de grafita compacta usinado.....	40
Figura 2.11 Fornos elétricos.....	45
Figura 3.1 Desenho esquemático do sistema de moldagem de cilindros secadores.....	59
Figura 3.2 Corpos de prova utilizados no ensaio de tração.....	61
Figura 3.3 Cilindro secador indicando as posições de retirada dos corpos de prova.....	62
Figura 4.1 Micrografias da liga ENGJL250.....	71
Figura 4.2 Micrografias da liga ENGJL300.....	72
Figura 4.3 Micrografias da liga ENGJL350.....	72
Figura 4.4 Micrografias da liga SA278CL35.....	72
Figura 4.5 Micrografias da liga SA278CL40.....	73
Figura 4.6 Micrografias da liga SA278CL45.....	73
Figura 4.7 Micrografias da liga SA278CL50.....	73
Figura 4.8 Micrografias do ferro fundido cinzento mostrando carbonetos.....	74

Figura 4.9 Micrografias do ferro fundido cinzento mostrando ferrita.....	75
Figura 4.10 Micrografias do ferro fundido cinzento mostrando steadita.....	75
Figura 4.11 Resultados da condutividade térmica em função da temperatura.....	78
Figura 4.12 Variação da pressão de teste com a variação da velocidade periférica para três ligas fundidas.....	84

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Teor de umidade do papel.....	5
Tabela 2.2 Composição química dos ferros fundidos comerciais não ligados.....	20
Tabela 2.3 Condutividade térmica dos principais componentes estruturais do ferro fundido.....	41
Tabela 2.4 Valores da condutividade térmica de ferro fundido cinzento.....	42
Tabela 3.1 Característica do forno à indução.....	52
Tabela 3.2 Painéis de vazamento e transferência.....	52
Tabela 3.3 Carga do forno.....	53
Tabela 3.4 Matérias primas utilizadas e a composição química.....	54
Tabela 3.5 Análise química planejada.....	55
Tabela 3.6 Especificação do inoculante utilizado.....	56
Tabela 3.7 Propriedades mecânicas especificadas.....	57
Tabela 4.1 Análise química obtida para cada liga.....	67
Tabela 4.2 Composição química para a liga SA278CL50 contendo Mo.....	67
Tabela 4.3 Valores de resistência à tração das ligas.....	68
Tabela 4.4 Valores de dureza das ligas.....	69
Tabela 4.5 Valores de resistência e dureza da liga com adição de Mo.....	70
Tabela 4.6 Condutividade Térmica Medida.....	76
Tabela 4.7 Espessura de parede da camisa do cilindro secador calculado para a liga SA278CL45.....	81
Tabela 4.8 Espessura de parede, peso e custo de fabricação.....	82
Tabela 4.9 Resultados obtidos por simulação, empregando as condições utilizadas na produção de papel para embalagem.....	83
Tabela A.1 Especificação do material do cilindro secador.....	93
Tabela A.2 Tensões permissíveis para o dimensionamento da espessura de parede de camisas sem falhas.....	93

Tabela A.3 Espessura de paredes do ENGLJ350.....	97
Tabela A.4 Espessura de paredes do ENGLJ300.....	97
Tabela A.5 Espessura de paredes do ENGLJ250.....	97
Tabela A.6 Espessura de paredes do SA278CL35.....	98
Tabela A.7 Espessura de paredes do SA278CL40.....	99
Tabela A.8 Espessura de paredes do SA278CL45.....	100
Tabela A.9 Espessura de paredes do SA278CL50.....	101

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

γ = Austenita

α = Ferrita

σ = Tensão de liga do cilindro secador

ΔV = Variação volumétrica

A= Distância entre centro dos mancais do cilindro secador

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASME = American Society of Mechanical Engineers

ASTM = American Society for Testing and Materials

ce= Calor específico

CE= Carbono equivalente

CT= Condutividade térmica

d= Densidade da liga da camisa do cilindro secador

D= Diâmetro interno do cilindro secador

DT= Difusividade térmica

e= Espessura da parede da camisa do cilindro secador

EN = Euronorma

F= Tensão de tela da máquina de produção de papel

Fe_3C = Carboneto de ferro

g= Aceleração da gravidade

GJL= Ferro fundido cinzento

HB= Dureza Brinell

L= Comprimento da camisa do cilindro secador

LT= Temperatura de início de solidificação

p= Pressão de teste do cilindro secador

PNB= Resina fenólica de cura a frio

RH= Fator de dureza relativa

R_m = Limite de resistência à tração

Sc= Grau de saturação

ST= Temperatura de fim de solidificação

v= Velocidade

1. Introdução

Atualmente no mundo globalizado, os negócios obrigam as indústrias a se dirigirem à produção em grande escala e a negociar os produtos como “commodites”.

As estratégias dessas indústrias, não importando seu ramo de atividade, são de produzir em larga escala, sempre através de grandes plantas de produção.

No caso da indústria de produção de papel, essa característica é observada na quantidade de produção diária, através das características da máquina de produção de papel, como velocidade, largura da folha e tipo de papel produzido. Hoje é possível encontrar máquinas de produção de papéis brancos ou imprimir, embalagens ou Kraft e jornais, com velocidade acima de 2200m/min e com largura de folha de até 10 metros. Na seção de secagem da máquina de produção de papel encontram-se os cilindros secadores, em numero entre 50 e 70 cilindros. Esses cilindros são vasos de pressão que trabalham aquecidos por vapor saturado atingindo 120°C em sua superfície externa e são pressurizados até 1MPa de pressão. Esses cilindros são fabricados em ferro fundido cinzento e pode pesar 20 toneladas como peça acabada.

A importância da secagem por cilindros secadores aquecidos por vapor é explicada pelos custos envolvidos na produção de papel. Os custos de remoção de água na máquina de produção de papel são distribuídos da seguinte forma: na formação da folha: US\$0,14/t de fibra, nas prensas: US\$1,90/t de fibra e na secagem: US\$22,00/t de fibra [1].

Na seção de secagem da máquina de produção de papel, o teor de umidade do papel no início é em torno de 60% e no final da

secagem é por volta de 2% e a temperatura média é em torno de 80°C.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e selecionar ligas de ferro fundido cinzento e testar em cilindros secadores as propriedades mecânicas adequadas e ao mesmo tempo satisfazer as propriedades térmicas, para substituir os ferros fundidos convencionais na produção dos cilindros secadores de grande porte. Pois, em função do aumento da velocidade e da largura da máquina de produção de papel, o ferro fundido convencional não é adequado em termos de propriedades mecânicas.

Atualmente são usadas as ligas ENGJL250, ENGJL300 conforme a norma EN [2] e SA278CL35, SA278CL40, SA278CL45 conforme a norma ASTM [3], para a fabricação dos cilindros secadores.

Neste trabalho foram desenvolvidas duas ligas, a ENGJL350 [2] e SA278CL50 [3].

Os cilindros secadores foram fabricados pelo processo de fundição em areia, as propriedades mecânicas foram medidas por ensaio de tração segundo norma EN [4] e ASTM [3] e o ensaio de propriedade térmica, por difusividade térmica segundo norma ASTM [5]. As microestruturas foram avaliadas por microscopia ótica com as amostras preparadas de acordo com a norma ASTM [6].

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Máquina de Produção de Papel

Data de pelo menos 3000 a.C. os espécimes mais antigos de papiro, preparado à base de tiras de caule de uma planta da família das ciperáceas, comum à beira do Nilo, no Egito. Sabe-se ainda de acordo com o Instituto do Papiro do Cairo, que o uso do papiro continuou até o século IX da era cristã [7].

A maioria dos historiadores credita a Ts'ai Lum (105 d.C.) a primazia de ter feito papel usando fibras vegetais [7].

Em 1799 Louis Nicolas Robert, na França inventou a primeira máquina de produção de papel, caracterizada por produzir a folha de papel de forma contínua. As primeiras máquinas fabricadas em escala industrial foram financiadas por Henry e Seeley Foudrinier, usando a patente de Robert comprada por Legir Didot, originando o nome usado até hoje de máquina Foudrinier ou mesa plana [8].

Simultaneamente na Inglaterra e nos Estados Unidos foram desenvolvidas as máquinas para a produção contínua da folha de papel com formação em formas redondas. Apesar das primeiras máquinas terem surgido no início do século XIX em locais e por processos de formação diferentes, estes processos são utilizados até hoje. Somente em 1821 surgem os cilindros secadores, aquecidos por vapor, primeiramente fabricados em aço e depois em ferro fundido cinzento, processo mantido até os dias de hoje [8].

2.2 Parte Úmida da Máquina de Produção de Papel

A parte úmida da máquina de produção de papel é constituída basicamente por: seção de formação, caixa de entrada,

mesa plana (ou máquina Foudrinier), duoformer e prensa.

Existem dois tipos de seção de formação, mesa plana (ou Foudrinier) e forma redonda, e é nesta seção que ocorre a formação da folha de papel.

Caixa de entrada é o equipamento que tem a função de fornecer fluxo de massa celulósica constante e uniforme em toda a largura da tela de formação da folha e através da regulagem dos lábios é controlada a gramatura e a velocidade da folha. Saindo da caixa de entrada em forma de jato, a massa com consistência de 0,3% até aproximadamente 3% de fibras é depositada sobre a tela formadora, sintética ou metálica (bronze), que retém as fibras e permite a drenagem da água. O processo de desaguamento ocorre por gravidade nas caixas “foils” e nos rolos desaguadores, e por sucção nas caixas de sucção.

O sistema duoformer visa eliminar o problema de desaguamento unilateral, que ocorre na tela de formação da mesa plana. Através do duoformer o desaguamento ocorre do centro para as faces da folha simetricamente, promovendo a melhor formação da folha.

A função das prensas é a remoção de água da estrutura capilar pela compressão da folha. O custo da secagem térmica é maior que a secagem mecânica, por isso, a grande importância da eficiência das prensas para minimizar o custo do papel acabado.

Basicamente a prensa é formada por dois rolos cilíndricos, um de borracha ou ebonite e outro de material mais duro como granito ou. As máquinas de papel geralmente possuem de duas a três prensas. As prensas trabalham com um feltro que serve de apoio e condução da folha e para absorver parte da água do papel ao passar pelo “nip” de prensagem.

A Tabela 2.1 mostra as porcentagens do teor de umidade do papel na entrada e na saída da prensa para alguns tipos papel [9].

Tabela 2.1: Teor de umidade do papel (em %) [9].

Tipo de Papel	Antes da prensagem	Após prensagem
Jornal	82 a 88	58 a 65
Embalagem	78 a 85	60 a 65
Branco	78 a 82	58 a 65

2.3 Parte Seca da Máquina de Produção de Papel

Inicialmente a secagem do papel era feita por transferência de calor por irradiação do sol e o vapor d'água liberado da folha era removido pela ação do ar. Posteriormente com a necessidade de aumento da produção, o processo evoluiu para os primeiros cilindros secadores por volta de 1821 [8].

O modo convencional de secagem é a passagem da folha de papel sobre cilindros aquecidos a vapor. A folha é mantida em contato íntimo com a superfície dos cilindros, por meio de feltros secadores.

Os cilindros secadores, geralmente feitos de ferro fundido, estão dispostos em duas fileiras superpostas ou em linha. A maneira de colocação e o número de cilindros são determinados pela gramatura da folha, umidade a ser removida, velocidade da máquina e pressão do vapor nas várias seções [7].

A parte de secagem de uma máquina convencional de produção de papel consiste em usar de 40 a 70 cilindros secadores, agrupados em duas a cinco seções superiores e duas a cinco seções inferiores, cada seção possui um feltro secador próprio. Esta separação possibilita controlar melhor o grau de encolhimento, reduzir o enrugamento e a ruptura da folha. A capacidade do grupo motriz para acionar o sistema e as características do feltro são parâmetros que permitem estabelecer

o número de seções necessárias. O aquecimento do cilindro se dá através da injeção de vapor de água em seu interior [8].

A Figura 2.1 mostra o esquema de secagem da folha em contato com o cilindro secador [8].

Na seção de secagem além de retirar a água, a folha deve ser transportada sem nenhum dano e as temperaturas dos cilindros, as tensões dos feltros e as alturas dos vãos entre os cilindros devem ser reguladas a fim de proporcionarem a qualidade do produto final [8].

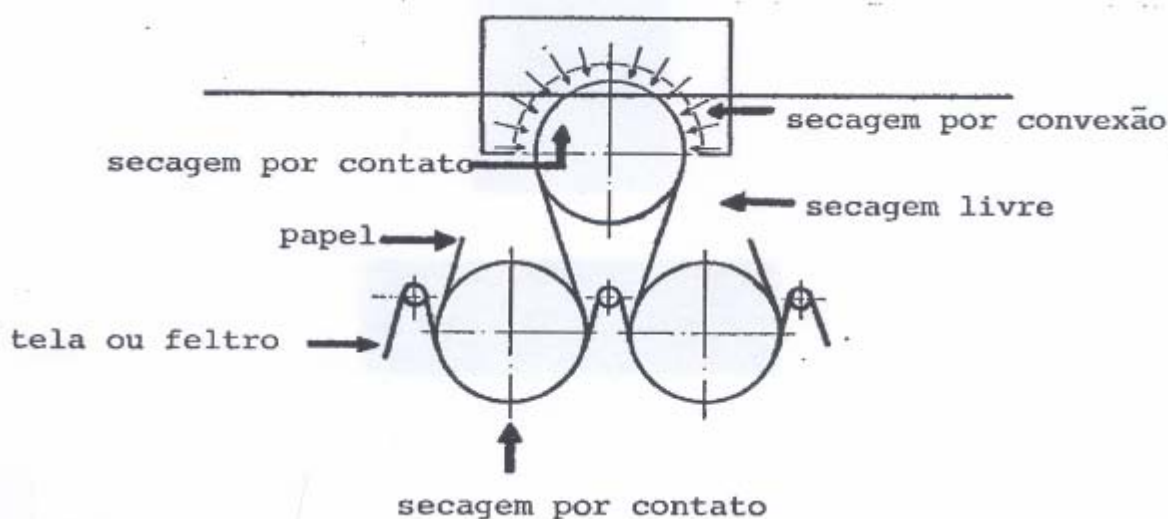


Figura 2.1: Esquema de secagem da folha de papel [8].

2.3.1 Ciclos de Secagem

O processo de secagem da folha num cilindro dentro de uma bateria de secagem pode ser dividido em quatro ciclos [7].

I – A folha de papel entra em contato com o feltro secador. Após juntar-se com o feltro a temperatura da folha aumenta acima da temperatura do feltro e aumenta a evaporação.

II - A folha e o feltro se movem em conjunto. A temperatura do feltro aumenta devido ao calor liberado do cilindro para a folha e desta para o feltro. A evaporação aumenta, porém, se o feltro

estiver mais frio que a folha, a evaporação poderá diminuir.

III - O feltro separa-se do cilindro e move-se livre para o outro cilindro. A temperatura do feltro diminui e a evaporação aumenta significativamente devido à superfície livre da folha.

IV - A folha separa-se do cilindro e move-se livremente para o próximo cilindro. A evaporação atinge seu ponto mais alto, em virtude das duas superfícies da folha estar livre e logo depois diminui rapidamente devido à queda da temperatura.

A Figura 2.2 mostra a relação entre a temperatura do papel e a evaporação específica da água na folha de papel dividida nas quatro regiões no entorno do cilindro secador [7].

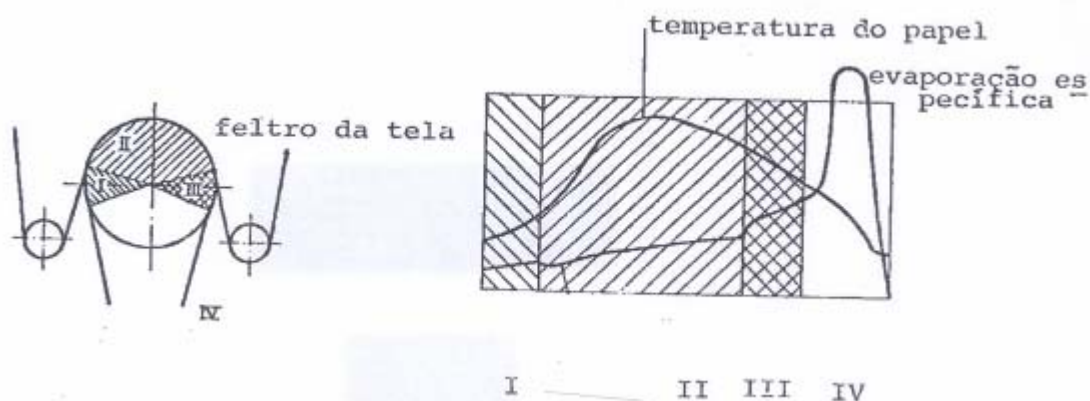


Figura 2.2: Perfil térmico e de evaporação durante a secagem num cilindro secador [7].

2.3.2 Vapor para Secagem de Papel

A pressão do vapor para a secagem da folha de papel depende da gramatura, do número de cilindros secadores, da velocidade da máquina e da eficiência do sistema de ventilação, o nível da pressão pode variar entre 0,1 a 1MPa [10].

Quando se aumenta a velocidade da máquina, há geralmente duas operações para incrementar a capacidade da parte de secagem: aumentar a área de secagem, isto é, o número de

cilindros secadores, ou elevar a pressão do vapor. Devido aos custos de cada uma destas alternativas, prefere-se modificar a característica do vapor [10].

A vantagem de aliar o uso de vapor à pressão mais elevada consiste na menor área de secagem e menor quantidade necessária de vapor.

Além da pressão, a eficiência do vapor depende de três características: grau de superaquecimento, os níveis de gases não-condensáveis e de substâncias contaminantes.

A deposição de ferrugem e de outras incrustações em tubulações e nos cilindros secadores também diminui a taxa de transmissão de calor e conseqüentemente, a condutividade térmica das paredes.

A condutividade térmica do ferro fundido é 85 vezes maior que a da água. Portanto, é de grande importância para a eficiência dos cilindros secadores que os condensados sejam retirados rapidamente e continuamente. A distribuição da água dentro do cilindro secador depende da velocidade de rotação. Em velocidades abaixo de 150m/min e em cilindros de 1,5m de diâmetro, a água condensada forma uma poça na parte inferior do equipamento. Em velocidades entre 150m/min e 300m/min, a poça de água tende a subir nas paredes internas do cilindro, produzindo turbulências irregulares. Isto causa secagem não uniforme e flutuações na rotação dos secadores, que podem produzir variações na velocidade da máquina e até ruptura da folha. Em velocidade acima de 300m/min, a força centrífuga projeta a água contra a superfície interna do cilindro, onde se distribui quase uniformemente. Nestas condições, a secagem é mais uniforme, a velocidade de rotação do cilindro secador é mais estável e o sistema motriz não sofre flutuações. A camada de água entre o vapor e a superfície do cilindro reduz a transmissão de calor, obrigando a elevar a pressão do vapor para obter igual eficiência

de secagem. Em máquinas de alta velocidade, este regime é adotado como norma de funcionamento, no qual se procura manter a espessura da camada condensada de água inferior a 0,8mm [8].

2.3.3 Cilindros Secadores

Os cilindros secadores geralmente são de ferro fundido cinzento e os eixos de ferro fundido nodular, com diâmetros externos da camisa de 1500mm e 1800mm.

A determinação da espessura da parede dos cilindros é comum para todos os tipos de papel respeitando os dados de máxima pressão de vapor aplicada, velocidade da máquina, largura da folha e tensão da tela (feltro). É necessário conhecer a condutividade térmica do material para atender a especificação mínima de projeto [8].

Para fornecer o calor necessário para secagem, o vapor é condensado dentro do cilindro secador em ferro fundido. O calor proveniente do vapor condensado passa de dentro do cilindro para a folha de papel, que envolvendo o cilindro parcialmente, gira para facilitar a passagem da tela, para que nenhum movimento relativo ocorra entre a folha e o cilindro secador.

A Figura 2.3 mostra um corte parcial de um cilindro secador com as máximas dimensões conhecidas [10].

A maioria dos cilindros secadores para seções de secagem é de 1,20m a 1,80m de diâmetro. Um grande número de máquinas modernas, onde as taxas de produção são altas, têm sido equipadas com cilindros secadores de 1,80m de diâmetro. As maiores máquinas de produção de papel têm cilindros secadores de aproximadamente 10m de comprimento. Um cilindro secador de 1,80m de diâmetro com uma espessura de parede de 30mm e 10m de comprimento pesa aproximadamente 20t [10].

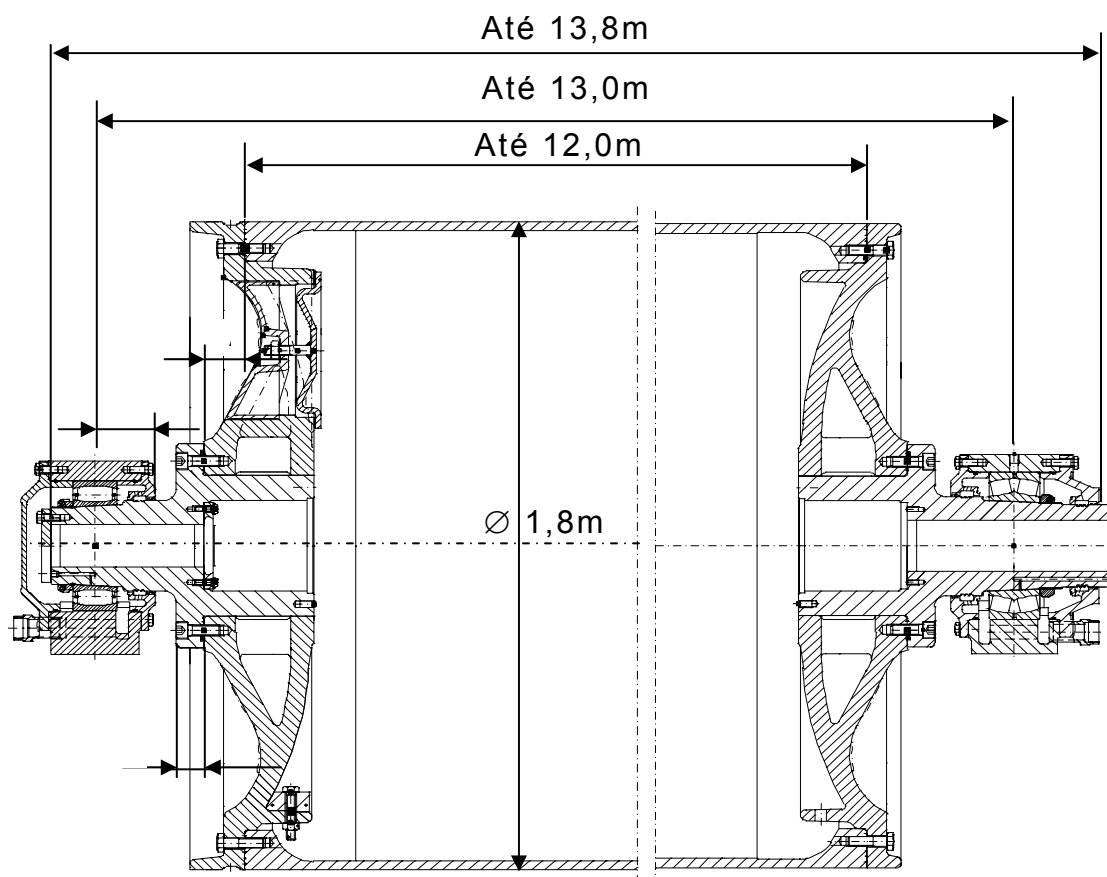


Figura 2.3: Cilindro secador [10].

Os cilindros secadores para máquina de produção de papel geralmente são feitos de ferro fundido cinzento. É comum e necessário realizar usinagem interna da peça bruta para garantir paredes uniformes e a superfície exterior deve estar livre de imperfeições que marcariam o papel. Usualmente é feita retificação fina no diâmetro externo do cilindro secador. O diâmetro deve ser exatamente como especificado para evitar que o cilindro seja puxado inadequadamente quando a máquina de produção de papel estiver em operação.

Em máquinas de maior largura, é comum a prática de perfuração em ambas as pontas de eixo, para permitir a saída do vapor de um ponto e remoção de condensação de outro. Porém, a maioria das máquinas antigas apresenta a saída de vapor e remoção de condensação através do acionamento final da ponta de

eixo [8].

É tradicional o uso do ferro fundido cinzento como um material para cilindros secadores em decorrência do seu baixo custo e sua facilidade de adquirir um bom acabamento, para resistir à corrosão interna e externa e manter a forma geométrica exata depois do tratamento térmico de alívio de tensão. As características de resistência mecânica e dureza superficial, também são considerações importantes, porque dispositivos raspadores (régua de raspagem) são usados em muitos cilindros secadores com a finalidade de destacar a folha de papel para evitar o risco de enrolamentos [10].

Os rolos duo estabilizadores são os responsáveis pelas novas velocidades das máquinas de produção de papel, por permitir a aderência da folha de papel junto ao cilindro secador e o feltro.

Em adição a esse efeito, os rolos melhoram a drenagem do vapor gerado pelo contato da folha de papel com o cilindro secador por meio de vácuo introduzido no interior do rolo duo estabilizador, que é constituído de chapa de aço ao carbono ou ferro fundido cinzento nas máquinas mais modernas e totalmente perfurado em sua superfície [9].

O diâmetro desses rolos pode atingir até 1450mm de diâmetro e seu comprimento segue as dimensões da máquina de produção de papel, podendo hoje ser de até 10m. A Figura 2.4 mostra o esquema de funcionamento do rolo duo estabilizador [10].

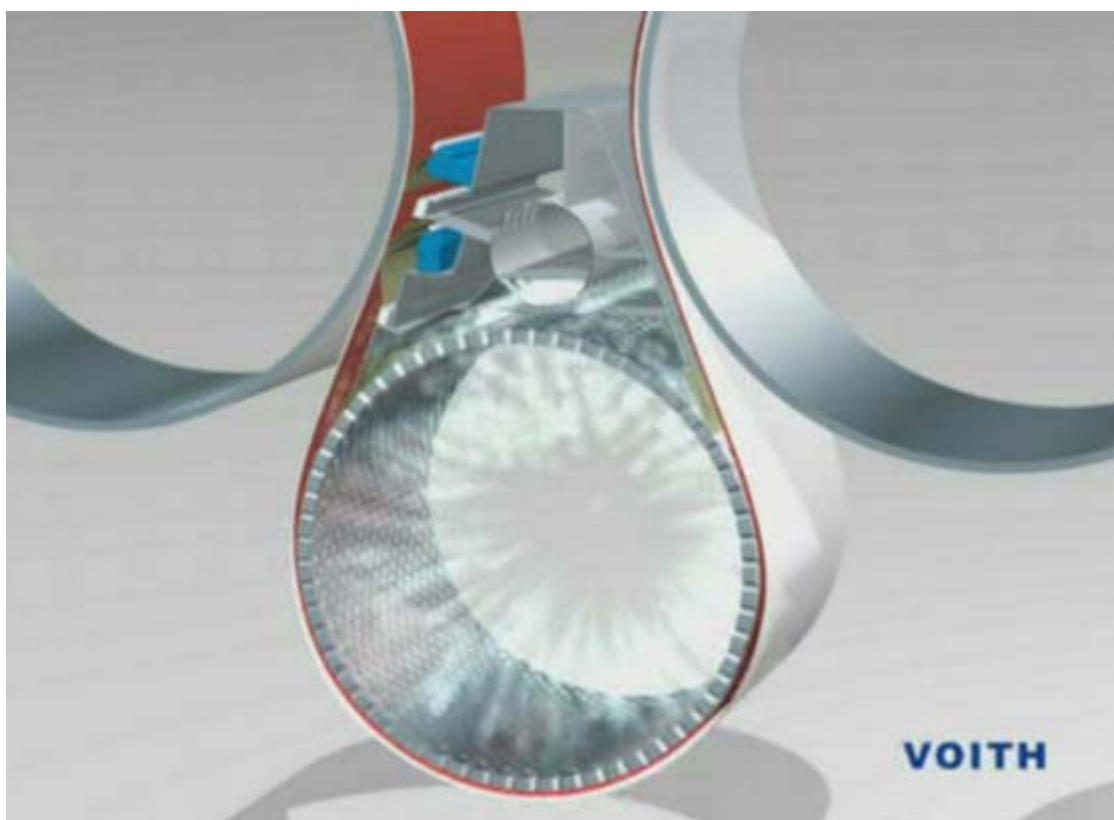


Figura 2.4: Rolo duo estabilizador [10].

2.4 Seção de Acabamento

A operação da calandragem visa alisar a folha de papel pela compactação de micros elevações da superfície da folha, a diminuição da rugosidade é conseguida por compressão, fricção ou pela combinação dos dois mecanismos [7].

Como último componente da máquina de produção de papel, a enroladeira tem a função de enrolar o papel em bobinas, para posteriormente seguirem para as seções de acabamento final (cortadeiras e rebobinadeiras). A Figura 2.5 mostra um desenho esquemático de uma máquina de produção de papel [10].

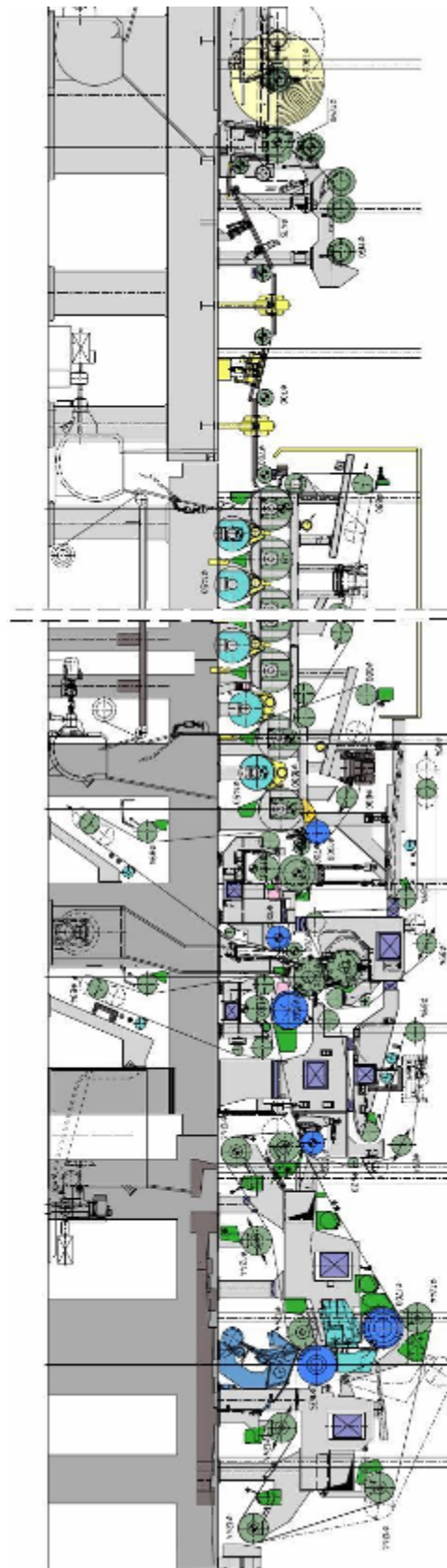


Figura 2.5: Desenho esquemático de uma máquina de produção de papel [10].

2.5 FERRO FUNDIDO

Um dos processos de fabricação mais antigo é o processo de fundição. Utilizado pela civilização desde 4.000 a.C. a 3.000 a.C. iniciando-se com o processo de fundição de cobre, seguindo com o bronze e posteriormente com o ferro, por causa do seu elevado ponto de fusão [11].

Em 1450 é que se iniciou a obtenção intermediária do ferro gusa, pois nessa época já se conseguiam maiores temperaturas nos processos utilizados. Em 1640, foi desenvolvido o primeiro alto-forno para produção de ferro gusa, nessa época, a indústria siderúrgica passou a ocupar um papel importante nas atividades comerciais e na economia dos países ocidentais, entretanto o consumo de carvão vegetal para a produção de ferro, provocou uma devastação florestal de repercussão danosa [11].

Somente em 1710, período da Revolução Industrial, é que as atividades siderúrgicas ganharam grande importância na Grã-Bretanha, o uso industrial do coque (derivado do carvão mineral) como substituto do carvão vegetal na redução do minério de ferro, provocou um novo e importante impulso na siderurgia [11].

2.5.1 Propriedades, Microestruturas e Processamento

Os ferros fundidos são materiais que oferecem grandes vantagens ao processamento por fundição como, aliás, a sua designação sugere, esta característica vem da sua composição química, próxima da eutética, que lhe garante boa fundibilidade [12].

O ferro fundido é uma liga de ferro-carbono-silício, de teores de carbono acima de 2% em peso de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita [12].

Nos ferros fundidos cinzentos, o cobre, o cromo, e o silício são eficazes na melhoria das propriedades mecânicas e resistência

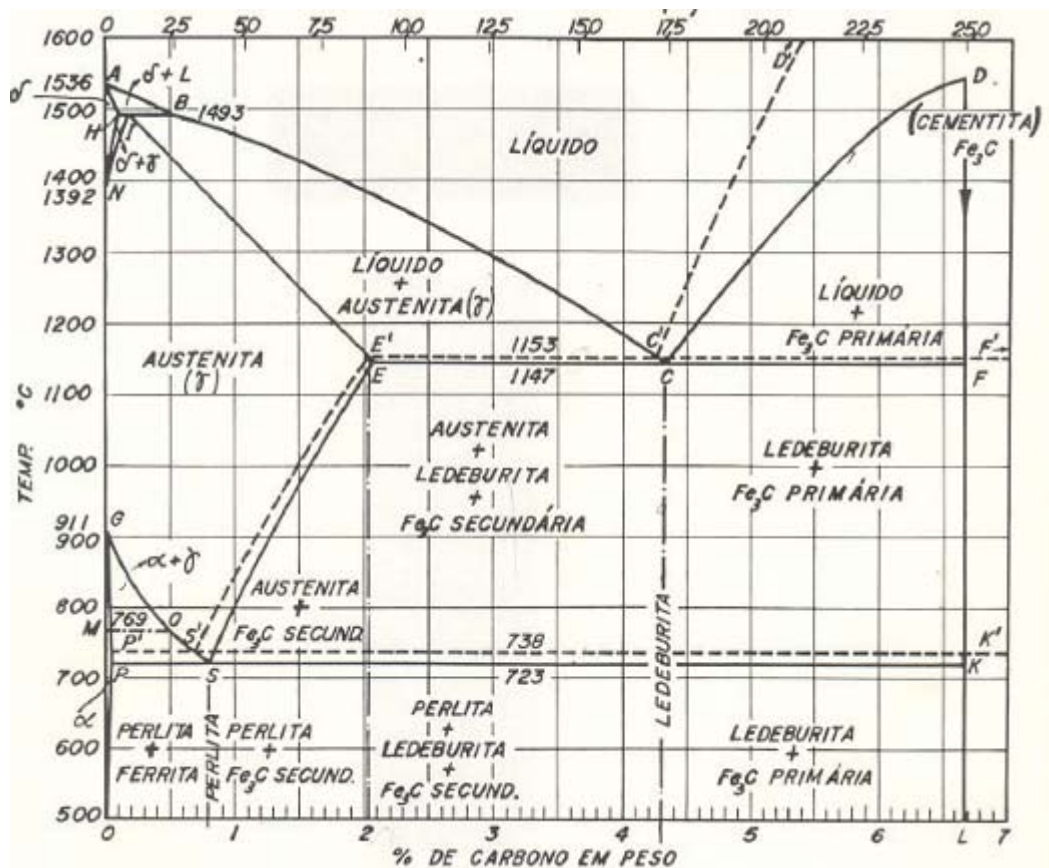
à corrosão [13].

O diagrama de equilíbrio Fe-C apresentado na Figura 2.6 admite duas opções para a solidificação de um ferro fundido: na forma metastável, indicada pela linha cheia no diagrama (com o carbono combinado na forma de carboneto de ferro Fe_3C) ou na estável, indicada pela linha tracejada no diagrama (com o carbono livre na forma de grafita).

São vários os fatores que podem levar um ferro fundido a solidificar segundo uma ou outra forma, os mais importantes são a composição química e a velocidade de resfriamento. Altos teores em carbono e silício e velocidade de resfriamento lenta favorecem a solidificação segundo a forma estável, isto é, a formação de um eutético grafitico, originando ferros fundidos cinzentos [12].

E baixos teores em carbono e silício e velocidade de resfriamento rápida favorecem a solidificação segundo a forma metastável, com formação de cementita, originando ferros fundidos brancos [12].

Uma mesma composição química pode originar um ferro fundido branco ou cinzento conforme a velocidade de resfriamento a que peça é submetida e esta é definida pela espessura da peça e pela natureza do molde em que a peça é vazada.



- - - - - Estável

————— Metaestável

Figura 2.6: Diagrama de equilíbrio Fe-C [14].

A velocidade de solidificação pode ainda ser controlada pela natureza do material do molde: paredes com elevada condutividade térmica (por exemplo, coquilhas metálicas) extraem rapidamente o calor, acelerando a velocidade de solidificação do metal líquido, paredes em areia (material refratário) impõem velocidade de solidificação lenta. A capacidade de extração de calor pelo molde de areia pode ser aumentada com a colocação coquilhas (massas metálicas que aceleram a condução do calor da peça para o exterior). O potencial grafitizante de um banho líquido pode ainda ser manipulado através da técnica da inoculação [15].

A grafita existente num ferro fundido cinzento pode

apresentar várias formas, cada forma pode assumir diferentes tamanhos, uma dada forma da grafita com um dado tamanho pode ainda distribuir-se de diferentes modos na matriz metálica. A forma, tamanho e distribuição da grafita num ferro fundido contribuem significativamente para as características finais do material, sendo por esta razão objeto de classificação em normas internacionais [16].

Os principais tipos comerciais de ferros fundidos são: cinzento, nodular, maleável e branco. Existem outros tipos que são casos particulares destes, como por exemplo, os ferros fundidos mesclados (com parte do carbono de solidificação na forma combinada e outra parte na forma de grafita) e os de grafita compacta (intermediária entre a grafita nodular e a lamelar) [16].

Dentro de cada um destes tipos existem várias possibilidades para a natureza da matriz metálica, que pode ser ferrita, perlita, ferrita-perlita, bainita, martensita e austenita. Cada matriz originará propriedades diferentes e classes de material diferentes, definidas em especificações internacionais.

Os ferros fundidos são ligas complexas de Fe-C-Si-Mn e as transformações sofridas por estas ligas podem ser mais bem compreendidas através do diagrama ternário Fe-C-Si, em cortes, mostrado na Figura 2.7 [14].

O silício tem um importante papel no diagrama de fases do Fe-C-Si, para que seja possível relacionar à composição química, as propriedades, a microestrutura e o processamento térmico de cada um dos principais tipos de ferro fundidos, bem como os objetivos dos diferentes tratamentos térmicos a que normalmente estes materiais são submetidos.

O silício é um elemento grafitizante e quanto mais elevado o teor, maior será a tendência das ligas apresentarem o carbono na forma de grafita livre, o silício inibe progressivamente a possibilidade de formação de carbonetos durante a solidificação.

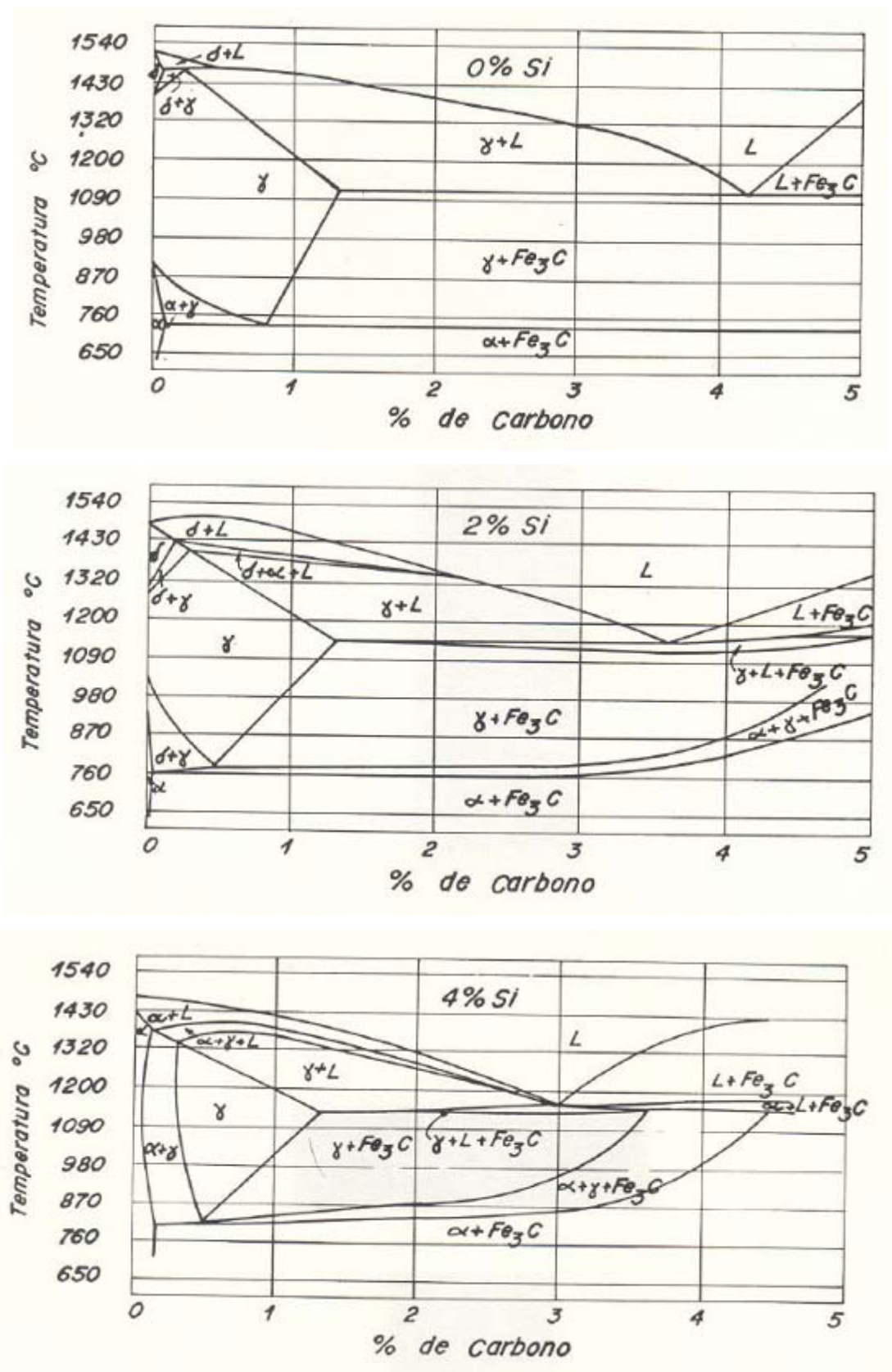


Figura 2.7: Cortes do diagrama ternário Fe-C-Si com 0, 2 e 4% de Si [14].

A presença do silício implica ainda alterações nas temperaturas de transformação dos ferros fundidos, como pode ser observado através da Figura 2.7, onde teores crescente de silício diminuem o teor em carbono do ponto eutético e do ponto eutetóide [14].

O silício endurece a ferrita por solução sólida, dando origem a resistências mecânicas superiores às que foram indicadas para os aços. A elevação do teor em silício provoca uma degradação da resistência ao choque, particularmente a baixas temperaturas de utilização [14].

2.5.2 Carbono Equivalente

Nos ferros fundidos comerciais, devido à presença de outros elementos, pode ocorrer alteração sensível das linhas e dos pontos do diagrama de equilíbrio Fe-C. Quanto aos efeitos dos elementos de liga sobre a composição eutética é comum ser expressar-se em termos de carbono equivalente (CE) e grau de saturação (Sc). São conceitos equivalentes, sendo o primeiro mais usado na literatura inglesa e o segundo na alemã. Ambos, CE e Sc indicam quão próximos está uma dada análise da composição eutética.

Esses conceitos são de importância tecnológica, pois quando se deseja um ferro fundido de boas propriedades mecânicas é importante ter as composições hipoeutéticas, ou seja, carbono equivalente menor do que 4,3 ou grau de saturação menor do que 1. Há elementos que elevam o carbono equivalente e o grau de saturação e outros que diminuem. Em geral, os primeiros atuam mais como grafitizantes, e os demais como antigrafitizantes (estabilizadores de carbonetos) [14].

No caso de ferros fundidos convencionais, os elementos que mais afetam o ponto eutético são silício e fósforo, conforme mostra a eq. (2.1)

$$CE = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3} \quad (2.1)$$

No caso de ferros fundidos de baixa liga é comum adotar fórmulas mais detalhadas para cálculo de CE e Sc, como mostra as eqs. (2.2) e (2.3) respectivamente [14].

$$CE = \%C + 0,31\%Si + 0,33\%P + 0,40\%S - 0,03\%Mn - 0,06\%Cr + 0,05\%Ni + 0,1\%Sn - 0,01\%Mo + 0,08\%Cu. \quad (2.2)$$

$$Sc = \%C / (4,26 - 0,31\%Si - 0,33\%P - 0,40\%S + 0,03\%Mn + 0,06\%Cr - 0,1\%Sn - 0,05\%Ni) \quad (2.3)$$

2.5.3 As principais Famílias de Ferros Fundidos

A Tabela 2.2 mostra as composições químicas dos principais tipos de ferros fundidos não ligados utilizados na prática industrial.

Tabela 2.2: Composição química (em %peso) dos ferros fundidos comerciais não ligados [11]

Elemento	Cinzento	Nodular	Maleável	Branco
C	2,5 – 4,0	3,0 – 4,0	2,0 – 2,6	1,8 – 3,6
Si	1,0 – 3,5	1,8 – 3,0	1,1 – 1,6	0,5 – 1,9
Mn	0,25 - 1,0	0,1 - 1,0	0,2 - 1,0	0,25 - 0,80
S	0,02 - 0,25	< 0,02	< 0,18	0,06 - 0,20
P	0,05 - 1,0	< 0,1	< 0,18	0,06 - 0,18

2.5.3.1 Ferro Fundido Cinzento

O ferro fundido cinzento de grafita lamelar possui elevada fluidez no estado líquido, capaz de produzir peças finas e de

formas complexas quando se solidifica, a grafita formada provoca uma expansão que contraria a contração metálica inerente à solidificação, originando peças com excelentes rendimentos de metal, muitas vezes dispensando o uso de alimentadores.

A literatura [14] tem mostrado que as mudanças de volume associadas à solidificação de um ferro fundido cinzento podem ser dadas pela eq. (2.4)

$$\Delta V (\%) = 2 (\%C_{\text{grafítico}} - 2,80) \quad (2.4)$$

O ferro fundido cinzento apresenta uma excelente usinabilidade e boa resistência ao desgaste por atrito (dada à presença da grafita, que atua como lubrificante), daí a sua aplicação em pistões, tambores e sapatas de freio, blocos de motores de combustão interna e discos de embreagem.

A resistência ao choque térmico é elevada, o que permite aplicações em cadinhos, queimadores, grelhas de fornos e lingoteiras. E apresenta ainda, alta capacidade de amortecimento de vibrações, podendo ser aplicada em bases de máquinas ferramentas e elevada resistência à corrosão permitindo aplicações em condutores de água e na indústria química em geral [15].

2.5.3.2 Ferro Fundido Nodular

O ferro fundido nodular de grafita esferoidal é obtido por tratamento do banho líquido com uma pequena adição de magnésio (inferior a 0,05% em peso, contendo em geral também cério e terras raras) que reagirá com o oxigênio e enxofre presentes no ferro líquido, evitando a interferência destes elementos na formação da grafita nodular durante a reação eutética.

O ferro fundido nodular apresenta características tecnológicas semelhantes às do ferro cinzento, com propriedades

mecânicas muito superiores, a forma da grafita atenua o efeito de entalhe provocado pelas lamelas do ferro fundido cinzento, permitindo resistências à deformação plástica muito mais elevada.

Este material substitui o ferro fundido cinzento e o aço em inúmeras aplicações. As sapatas e tambores de freio, carcaças de diferenciais, rodas dentadas ou engrenagens, válvulas, lingoteiras são exemplos típicos de aplicações do ferro fundido nodular [15].

2.5.3.3 Ferro Fundido Maleável

O ferro fundido maleável é obtido por tratamento térmico de grafitização de um ferro fundido branco, o qual vai possibilitar a formação de grafita de forma nodular irregular, próxima à do ferro fundido nodular. A sua elaboração exige uma composição que imponha uma solidificação segundo a versão metastável do diagrama Fe-C, em consequência o rendimento do metal vazado é muito inferior ao obtido para o ferro fundido cinzento e neste caso não há formação de grafita durante a solidificação.

Este tipo de ferro fundido pode competir com o ferro fundido nodular em todas as aplicações de peças com paredes finas, as aplicações mais comuns se encontram nas indústrias automobilísticas, de transporte, de energia e nos acessórios de canalização de vários fluidos (conexões) [15].

2.5.3.4 Ferro Fundido Branco

O ferro fundido branco tem como principal utilização a produção de ferro fundido maleável. A composição é normalmente hipoeutética e a microestrutura é composta por ledeburita transformada (dado que a austenita do eutético origina perlita no resfriamento) e perlita (proveniente da austenita proeutética).

A alta dureza possibilita aplicações em que se exija uma elevada resistência ao desgaste, geralmente em peças que não sofrem esforços de choque, pois o ferro fundido branco é muito

frágil [15].

2.5.4 Microconstituintes do Ferro Fundido Cinzento

Durante a solidificação dos ferros fundidos cinzentos formam-se grafita e austenita. A austenita pode sofrer, no estado sólido, novas transformações de fase que tendem a se decompor em perlita e ou, ferrita em temperaturas próximas a 750°C.

Numa primeira aproximação pode-se dizer que a solidificação de um ferro fundido cinzento ocorre segundo o diagrama estável, embora não necessariamente em condições de equilíbrio, com a formação de grafita e austenita e que as transformações no estado sólido tendem a ocorrer segundo o diagrama metaestável, com a formação de perlita e ferrita. Os microconstituintes usuais de um ferro fundido cinzento comum são: grafita, perlita e ferrita [14].

2.5.4.1 Grafita

A grafita ocupa um volume de 10% a 17%, dependendo da análise química e da velocidade de resfriamento. No ferro fundido cinzento a grafita forma-se quase que exclusivamente durante a solidificação. A grafita num ferro fundido pode variar não só em quantidade como em morfologia como: forma (I-Lamelar, II-Roseta, III- Vermicular, IV-Semi-Compacta, V- Compacta, VI-Esféroidal), tamanho (1 a 8) e distribuição (A, B, C, D, e E). A morfologia da grafita é classificada segundo as normas técnicas EN ISO 945 [17].

2.5.4.2 Perlita

Perlita é o microconstituente mais comum dos ferros fundidos cinzentos, sendo formado por lamelas alternadas de ferrita e cementita e atua no sentido de aumentar a resistência mecânica e a dureza. A formação de perlita é favorecida pela presença de grafita tipo A (lamelas finas e uniformes, distribuídas ao acaso) e

elevadas velocidades de resfriamento no intervalo de temperatura entre 900-650°C [16].

2.5.4.3 Ferrita

Ferrita é uma solução sólida de ferro alfa e carbono e ocorre nos ferros fundidos quando o resfriamento é mais lento na faixa de temperatura entre 850-550°C e com a presença de grafita fina, tipo D..

A estrutura totalmente ferrítica (com grafita tipo A) pode ser obtida por tratamento térmico de recozimento, quando se deseja, ferros fundidos cinzentos com alguma ductilidade e máxima usinabilidade [16].

2.5.4.4 Cementita Livre e Steadita

A cementita livre pode ocorrer durante a solidificação, devido à altas velocidades de resfriamento, ou pela presença de elementos estabilizadores de carbonetos. A “steadita” (eutético fosforoso) pode aparecer em ligas comerciais, devido a presença de fósforo. É um eutético de baixo ponto de fusão (950-1050°C) que tende a ocorrer em regiões que se solidificam por último (regiões intercelulares). Tanto a cementita livre como a “steadita” tendem a aumentar a dureza e a fragilidade do material, dessa forma deve-se mantê-las abaixo de 5% na microestrutura, para não prejudicar a aplicação tecnológica [16].

2.5.5 Influência dos Principais Elementos Químicos

A composição química controla em grande parte as propriedades, principalmente porque nem sempre é fácil controlar a velocidade de resfriamento de uma peça no molde, principalmente peças de grande porte. Entretanto, não convém especificar um dado ferro fundido pela composição química para

obter um conjunto de propriedades, pois as variáveis de processo podem afetar de modo decisivo as propriedades finais [14].

Todos os elementos químicos normalmente presentes num ferro fundido cinzento exercem influência tanto na microestrutura como nas propriedades.

2.5.5.1 Carbono

O carbono é o elemento mais importante em ferro fundido cinzento e é responsável pelas propriedades mecânicas e de fundição. Com exceção do carbono na forma de perlita na matriz, o carbono está presente como grafita em forma de veios. O carbono combinado em ferros fundidos cinzentos perlíticos, em geral, varia de 0,5% a 0,8% e o carbono grafítico de 2,0% a 3,0% [18].

2.5.5.2 Silício

O silício atua como grafitizante tanto na solidificação como nas transformações no estado sólido, favorecendo a formação de grafita e reduzindo o coquilhamento e as transformações da ferrita no estado sólido. O silício fica em solução sólida na ferrita e juntamente com o carbono, pode afetar a fundibilidade da liga [18].

2.5.5.3 Manganês

O manganês é um elemento perlitizante e o seu principal papel é a neutralização do enxofre, pois, quando este se encontra em teores elevados, dá origem à precipitação de sulfeto de ferro (por insuficiência de Mn), podendo ocorrer o fenômeno designado por têmpera invertida. Tal fato é devido à segregação do enxofre para as zonas mais espessas das peças, que devido ao seu efeito antigrafitizante ocorre o aparecimento de uma estrutura branca [13].

2.5.5.4 Enxofre

O enxofre em presença de ferro terá tendência a formar sulfeto de ferro, que precipitará no estágio final da solidificação, fragilizando a estrutura devido à sua distribuição. No entanto, a presença de manganês permite o aparecimento de sulfetos complexos de ferro e manganês que precipitarão numa fase inicial da solidificação e estarão distribuídos aleatoriamente ao longo da matriz, não influenciando significativamente as propriedades mecânicas. O enxofre também tem um papel signficante na nucleação da grafita nos ferros fundidos cinzentos [13].

2.5.5.5 Fósforo

O fósforo é encontrado em todos os ferros fundidos e raramente é adicionado intencionalmente, geralmente é proveniente da sucata e dos lingotes de gusa. Dependendo do teor de fósforo, este pode aumentar a fluidez do ferro, porem não deve exceder 0,15%P, quando se pretende obter ferros de elevada resistência. A maioria dos ferros fundidos é produzida com 0,02%P a 0,10%P, para evitar um aumento da dureza e a fragilidade do material, devido a formação do microconstituente chamado “steadita”. Dessa forma devido aos efeitos que ocorrer na solidificação do ferro fundido, é usual englobar o teor deste elemento na expressão do carbono equivalente [13].

2.5.6 Inoculação

A inoculação é um procedimento comum na atual prática metalúrgica de elaboração de ferros fundidos cinzentos, quaisquer que sejam os seus tipos de grafita, modo de elaboração ou processo de fundição [15].

Existem diversos modos de inoculação, com modificação no tipo de liga, granulometria, forma, momento e teor de adição.

Esta prática foi aplicada e desenvolvida com a fabricação de fundidos para a indústria de guerra. Na década de 20 iniciaram-se estudos científicos com a utilização de diversos tipos de materiais, principalmente com o ferro silício, da classe 75% de silício [13].

A inoculação consiste na adição de uma pequena quantidade de um produto “ativo” ao metal líquido, normalmente à base de grafite ou um ferro silício, que ao se dissolver promove a formação de germes heterogêneos, necessários à precipitação da grafita [13].

Devido ao modo de solidificação do ferro fundido, a grafita tem dificuldade em germinar, em especial quando a velocidade de resfriamento é alta, típica de seções de espessura fina [13].

Os efeitos provocados pela inoculação são: aumento da densidade de grãos eutéticos, evitando a precipitação de carbonetos primários e diminuindo a sensibilidade à variação da espessura de parede da seção mais fina; melhoria na usinabilidade; e promove formação da grafita tipo A no ferro fundido cinzento lamelar e melhora a forma esferoidal da grafita no ferro fundido nodular [16].

2.5.7 Influência dos Elementos de Liga

Ferros fundidos cinzentos de alta resistência e sem a adição de elementos de liga, podem ser obtidos por um controle rigoroso da composição e da técnica de processamento. São ligas de baixo carbono equivalente e conseqüentemente tendem a ter menor fluidez, maior contração na solidificação, maior tendência à formação de carbonetos e a formação de ferrita associada à grafita de super-resfriamento [14].

Adições de elementos de liga facilitam a obtenção de ferros fundidos cinzentos de alta qualidade, pois além de permitirem a obtenção de altas resistências com carbono equivalente mais

elevado, favorecem a reprodutibilidade e tornam as estruturas e as propriedades menos sensíveis à variação da espessura. Como consequência a adição de elementos de liga não deve ser considerada necessariamente como um aumento do fator custo, pode ser até menor aumentando assim a relação custo - benefício [18].

A ação dos elementos de liga pode ser interpretada pelos efeitos microestruturais e as influências nas propriedades. Nestes materiais com a adição dos elementos de liga, em geral, visa-se aumentar as resistências à tração e ao desgaste, além da tenacidade, sem prejudicar a usinabilidade e a tendência ao coquilhamento. Como esses fatores tendem a ser antagônicos, há necessidade de um balanceamento correto dos elementos químicos [16].

2.5.7.1 Cobre

O cobre tem uma ação grafitizante, diminuindo a tendência à formação de regiões coquilhadas. O seu efeito grafitizante em relação ao silício é de 1 para 4, assim quando se deseja aproveitar melhor o efeito da adição isolada de cobre na resistência mecânica, recomenda-se a redução no teor de silício de 0,25% para cada 1% de cobre adicionado. É um perlitzante mais eficiente que o níquel, principalmente para eliminar traços de ferrita. Os teores usuais estão entre 0,5%Cu a 2%Cu, em peças espessas podem usar até 3%Cu. O aumento da resistência e da dureza é principalmente devido à sua ação na reação perlítica. Tem efeito favorável na usinabilidade e tende a melhorar a resistência à corrosão, principalmente em meios contendo enxofre [19].

2.5.7.2 Cromo

O cromo pode estar presente em quantidades inferiores a 0,10%Cr como residual vindo da matéria-prima (sucata). Quando

se deseja aumentar a resistência à tração e a dureza pode-se adicionar teores de 0,15%Cr a 1,0%Cr. Até teores da ordem de 0,30%Cr podem ser adicionados isoladamente, acima dessa faixa recomenda-se adicionar também um elemento grafitizante para evitar a formação de carbonetos, em particular, em seções finas e peças com cantos vivos.

Em ferros fundidos cinzentos de baixa liga, o teor de cromo recomendado é aquele capaz de produzir uma estrutura completamente perlítica, sem a formação de carbonetos livres nos contornos das células eutéticas ou sob a forma de ledeburita.

Além de aumentar a resistência à tração e a dureza o cromo pode ser empregado para aumentar a resistência à oxidação. Nessas aplicações os teores devem ser acima de 1,5%Cr [14].

2.5.7.3 Níquel

É um elemento grafitizante médio semelhante ao cobre, diminuindo a tendência de formação de carbonetos na solidificação. Na reação eutetóide atua como perlitizante e como consequência tende a aumentar a dureza e a resistência à tração. Em ferros fundidos cinzentos de baixa liga os teores adicionados estão entre 0,25%Ni a 3,0%Ni; a faixa mais comum é entre 0,5%Ni a 1,5%Ni, sendo usado principalmente para contrabalançar o efeito estabilizador do cromo, do molibdênio e do vanádio [16].

2.5.7.4 Molibdênio

É um elemento particularmente efetivo para aumentar a resistência à tração, a dureza e o módulo de elasticidade. É adicionado em teores entre 0,20%Mo a 0,80%Mo, os melhores efeitos são obtidos quando o teor de fósforo for abaixo de 0,10%P, pois o molibdênio, assim como o cromo, tende a formar um eutético complexo com o fósforo, que reduz o efeito desse elemento de liga. O molibdênio possui menor tendência à formar

carbonetos que o cromo, vanádio e o tungstênio, refina a perlita e favorece a obtenção de estrutura bainítica. Em teores baixos, quando usado isoladamente favorece a obtenção de ferrita na matriz e aumenta significativamente a temperabilidade. O molibdênio é extensamente usado para aumentar as propriedades em temperaturas elevadas [16].

2.5.8 Gases no Ferro Fundido Cinzento

Nos últimos anos, tem havido preocupação no estudo dos efeitos dos gases hidrogênio, oxigênio e nitrogênio nos ferros fundidos. Uma das razões dessa preocupação é em consequência da tendência de substituição dos equipamentos de fusão, isto é, passagem de fornos tipo cubilô para fornos elétricos de fusão e a variação nos tipos de cargas metálicas. Algumas diferenças de propriedades mecânicas do produto têm sido atribuídas aos teores de gases dissolvidos [14].

2.5.8.1 Nitrogênio

O nitrogênio tem efeito perlitizante e atua favoravelmente na morfologia da grafita diminuindo o efeito de entalhe. Aumenta a resistência mecânica e favorece a sanidade das peças por reduzir o número de células eutéticas. Normalmente os ferros fundidos contêm 0,001%N a 0,008%N, teores acima de 0,010%N podem produzir porosidade (gases). O titânio neutralizaria os efeitos prejudiciais do nitrogênio [14].

2.5.8.2 Hidrogênio

Os teores de hidrogênio usualmente variam entre 50-300 ppm e é facilmente absorvido da umidade (atmosfera, refratários, moldes, etc). Em teores baixos pode ter efeito benéfico favorecendo a formação de grafita tipo A e matriz perlítica, mas em geral tende a ser considerado como prejudicial. Pode atuar como

estabilizador de carbonetos e provocar o coquilhamento inverso (particularmente quando o enxofre for alto) e degenerar a grafita. A degeneração da grafita ocorre principalmente quando existe chumbo, selênio ou telúrio e hidrogênio juntos. Em altos teores produz "pin-holes". Os seus efeitos não são neutralizados por outras adições, é necessário evitar a sua absorção [14].

2.5.8.3 Oxigênio

Os teores de oxigênio geralmente estão entre 0,0005% a 0,01%. Os efeitos sobre a estrutura do ferro fundido cinzento dependem da forma em que se encontra o oxigênio (óxido de silício, óxido de ferro, etc), mas a sua atuação ainda não está completamente esclarecida. Em geral, o ferro fundido oxidado (alto teor de oxigênio) apresenta baixa fluidez e uma tendência a apresentar defeitos tais como: rechupe, gases e elevada tendência ao coquilhamento. A desoxidação com cálcio ou alumínio, tende a neutralizar os efeitos do oxigênio. Os teores de alumínio recomendados para ser adicionado como desoxidante, na panela de vazamento, é da ordem de 0,005% a 0,02% [14].

2.5.9 Principais Propriedades dos Ferros Fundidos Cinzentos

As propriedades mais comuns especificadas na comercialização de ferros fundidos cinzentos são: a resistência à tração e a dureza, embora não sejam necessariamente essas propriedades que determinam o comportamento em serviço. Entretanto, as demais propriedades, de certo modo, podem ser relacionadas com essas duas. A principal justificativa ao uso dessas duas propriedades para especificar o produto é que elas são relativamente fáceis de serem determinadas. Em casos específicos outros ensaios podem ser necessários, principalmente ensaios dinâmicos (se as aplicações envolverem esse tipo de solicitação) [12].

2.5.9.1 Resistência à Tração

Em projeto procura-se dimensionar as solicitações de modo a evitar tensões maiores que o limite de escoamento. Em ferros fundidos cinzentos, como o limite de escoamento tem valor próximo ao limite de resistência, o que de certo modo permite usar o material sob elevadas tensões, o dimensionamento baseia-se, em geral, no limite de resistência. O limite de escoamento, que é comparável ao de aço fundido de baixo carbono, no caso de ferro fundido cinzento normalmente não é determinado nos ensaios mecânicos [20].

O alongamento é uma medida de ductilidade obtida no ensaio à tração e em geral é menor que 1% para os ferros fundidos cinzentos e não é determinado, o que não significa que seja sempre desprezível [20].

Nos ferros fundidos cinzentos o limite de resistência à tração R_m varia de 100MPa a 400MPa, essa propriedade depende principalmente da composição química, da microestrutura, das velocidades de solidificação e de resfriamento. A velocidade de solidificação tem um efeito direto na morfologia da grafita e nas dimensões das células eutéticas. A velocidade de resfriamento após a solidificação é um dos fatores determinantes da estrutura da matriz metálica [16].

Os ferros fundidos com CE acima de 4,3% são hipereutéticos e geralmente contém grafita grosseira e apresentam baixa resistência mecânica, mas tendem a apresentar alta resistência a choques térmicos e boa capacidade de amortecimento de vibrações. Ferros fundidos com CE menor que 4,3% são hipoeutéticos e podem ser de alta resistência, pois a quantidade e tamanho dos veios da grafita decrescem com a diminuição do CE [14].

É comum tentar determinar relações entre limite de resistência, composição química e espessuras. Essas relações são

apenas indicativas, mas servem como orientação geral, pois nem sempre é possível ter fácil acesso a laboratórios de ensaios mecânicos. Procuram-se deduzir, baseado em análise estatística, expressões quantitativas que permitam estimar a provável resistência, a priori, em função da composição e velocidade de resfriamento.

Uma das primeiras relações foi apresentada por Jungbluth e Heller para corpo de prova de diâmetro de 30mm estabeleceram a eq. (2.5) [14].

$$R_m \text{ (MPa)} = 1005 - 809 Sc. \quad (2.5)$$

Tem-se procurado estabelecer o efeito individual de cada elemento num ferro fundido cinzento comum (sem elemento de liga). Uma das expressões mais recentes para corpos de prova de 30mm de diâmetro é mostrado pela eq. (2.6) [14].

$$R_m \text{ (MPa)} = [81,21 - 15,86\%C - 4,81\%Si + 5,19\%Mn + 2,81\%S + 80,95 (\%Mn 0,65) (\%S - 0,095) \pm 2,52] \times 9,806 \quad (2.6)$$

Estima-se o limite de resistência provável (limite de resistência normal) a partir do intervalo “líquidus-solidus” de solidificação obtida por análise térmica segundo a eq. (2.7).

$$R_m \text{ (MPa)} = 164 + 1,85 (LT - ST) \quad (2.7)$$

onde: LT é a temperatura de início de solidificação e ST é a temperatura de fim de solidificação em °C [14].

2.5.9.2 Dureza

Apesar das especificações dos ferros fundidos cinzentos utilizarem resistência à tração como principal propriedade

mecânica, é comum o uso do ensaio de dureza como uma indicação aproximada da resistência à tração, e de outras propriedades, como por exemplo, da usinabilidade.

A dureza tende a ser um ensaio menos significativo que o ensaio de tração e este mede melhor o efeito combinado da matriz, da morfologia e da quantidade de grafita. A relação entre limite de resistência à tração e dureza Brinell em ferros fundidos cinzentos tende a apresentar maior dispersão do que em aço. A relação (resistência / dureza) tende a ser maior em ferros fundidos ligados [14].

No caso de ferros fundidos cinzentos deve-se ter cuidados no ensaio de dureza. O ensaio mais recomendado é o ensaio Brinell com carga de 3000kg e esfera de 10mm de diâmetro. Quando a espessura da seção for muito pequena ou por outras razões podem-se usar cargas e esferas menores (carga de 750kg e esfera de 5mm), mas nesses casos a dureza indicada pode ser ligeiramente diferente (em geral, menor) [21].

Semelhante ao que se apresentou para resistência à tração, diversos autores tem se baseado em análises estatísticas, para estabelecer relações entre dureza Brinell e composição química.

As expressões mais usadas para corpos de prova de 30mm de diâmetro são as eqs. (2.8) e (2.9) [14].

$$HB = 530 - 344 Sc. \quad (2.8)$$

Considerando o efeito individual de cada elemento químico, a expressão usada é a eq. (2.9).

$$HB = 444,89 - 73,00 \%C - 12,64 \%Si + 23,85 \%Mn + 187,19 \%S + 65,53 [(\%Mn - 0,65)(\%P - 0,34)] \pm 12,32. \quad (2.9)$$

2.5.9.3 Relação entre Resistência à Tração e Dureza

Sabe-se que a razão de se fazer ensaios mecânicos é garantir a qualidade do produto. As normas especificam os corpos de prova padrões e as técnicas para realizá-los.

Há críticas de que os ensaios realizados em corpos de prova não representariam as propriedades da peça em princípio a crítica é válida, não só no caso de ferros fundidos cinzentos, mas para todos os metais ou ligas fundidas. No caso de ferros fundidos cinzentos comuns a técnica de obtenção do corpo de prova é simples, e as condições de solidificação dos corpos de prova podem ser consideradas semelhantes à das peças.

No caso de ferros fundidos cinzentos as experiências têm mostrado que, de um modo geral, se o corpo de prova tem o mesmo histórico térmico que a seção da peça em análise, a dureza e a resistência à tração serão similares [14].

Têm-se tentado relacionar resistência à tração e dureza em corpos de prova e em peças, ou seja, conhecendo-se a dureza de uma seção pode-se estimar a sua resistência à tração, conforme mostra a eq. (2.10).

$$HB = 100 + 0,43R_m \quad (2.10)$$

onde: R_m é resistência à tração em MPa.

Dureza e resistência à tração assim como módulo de elasticidade de uma determinada classe de ferro fundido com grafita lamelar, são comparáveis entre si em relações próximas. A relação empírica entre a dureza e resistência à tração é dada pela eq. (2.11) [2].

$$HB = RH \times (A + B \times R_m) \quad (2.11)$$

onde: R_m = resistência à tração em MPa, A e B são constantes ($A=100$ e $B=0,44$) e o fator RH é denominado dureza relativa e normalmente varia de (0,8 a 1,2).

Devido à alteração da dureza relativa é difícil definir uma regra com limites definitivos, tanto para a resistência à tração como também para a dureza.

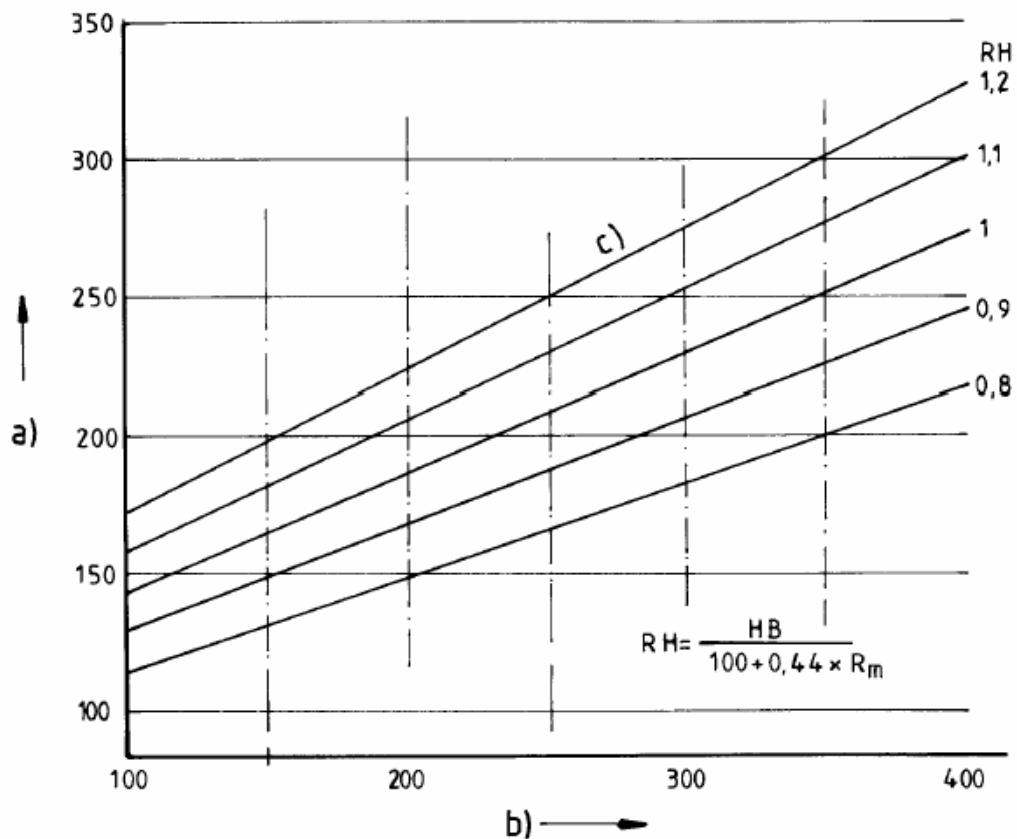
O fator RH é influenciado substancialmente pela matéria prima, pelo processo de fusão e pelo sistema de trabalho metalúrgico. Dentro de uma e mesma fundição estas influências podem ser mantidas constantes, por isso o fabricante pode indicar tanto a dureza como também a correspondente resistência à tração. A Figura 2.8 permite estimar resistência à tração da peça em função da dureza Brinell.

Outra forma de avaliar o limite de resistência de uma peça, conhecendo-se a dureza Brinell e a composição, é dada pela eq. (2.12) [14].

$$R_m \text{ (MPa)} = K + 0,13 \text{ HB} - 6,50\%C - 2,55 \text{ Si} - 3,20\%P \quad (2.12)$$

A constante K será 262MPa se a dureza for determinada no meio da seção e o valor será igual a 228MPa se medido na superfície. Esta expressão será válida para peças pequenas, médias e grandes, desde que a matriz apresente estrutura perlítica.

Convém salientar que essas expressões são estimativas e os valores precisos teriam que ser obtidos da própria peça em estudo [14].



- a) Dureza Brinell
- b) Resistência à tração R_m em MPa
- c) Dureza relativa, RH

Figura 2.8: Dureza em relação à Resistência à Tração [2]

2.5.9.4 Usinabilidade

Em muitas aplicações a usinabilidade pode ser mais importante que a resistência à tração. Os ferros fundidos cinzentos apresentam relativamente boa usinabilidade, devido principalmente à grafita, que além de atuar como autolubrificante, atua como fragilizante de cavaco. A usinabilidade depende principalmente da composição química e da estrutura da liga. O ferro fundido de baixa resistência tem melhor usinabilidade que o de alta resistência, por essa razão é comum especificar-se baixa dureza

para melhorar a usinabilidade.

Entretanto, ferros fundidos hipereutéticos não apresentam bom acabamento na usinagem devido ao excesso de grafita. Um dos cuidados críticos, quanto à usinabilidade, é a presença de carbonetos livres que podem ocorrer principalmente em peças finas. Isso pode ser evitado principalmente por controle da composição química e inoculação de compostos grafitizantes.

A inoculação é uma técnica freqüente para melhorar a usinabilidade, convém ainda lembrar que em peças fundidas é importante uma boa limpeza superficial, pois a areia é extremamente abrasiva [16].

De acordo com Dawson [22], os principais fatores que influenciam na usinabilidade dos ferros fundidos são:

-Efeito da forma da grafita

A formação do cavaco para o ferro fundido é diretamente afetada pela presença de grafita, que tem baixa resistência mecânica e gera descontinuidade e concentração de tensão na matriz, ajudando a remoção de metal no processo de usinagem.

A Figura 2.9 mostra o mecanismo de formação do cavaco no ferro fundido cinzento. A Figura 2.9a, mostra que no início a ferramenta de corte comprime a superfície da peça criando uma fratura no metal que se propaga de acordo com o ângulo de corte. Na Figura 2.9b é observado o movimento do corte que a ferramenta processa, o material fragmentado é completamente destacado. A Figura 2.9c mostra que no ferro fundido o material é destacado, fazendo que haja uma perda de contato entre a ferramenta de corte e a peça em usinagem até a formação de um novo cavaco. A Figura 2.9d mostra que a remoção acentuada de material provoca uma alta rugosidade na peça usinada [22].

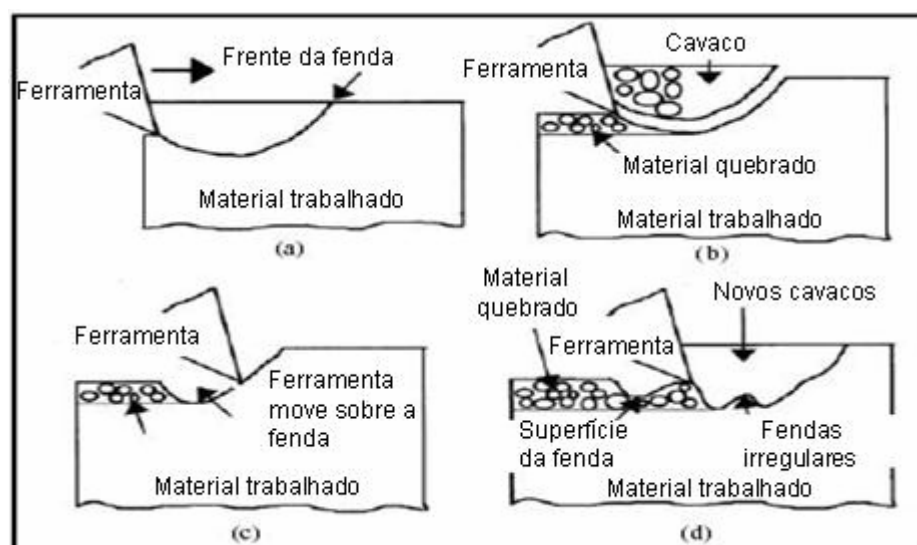


Figura 2.9: Desenho esquemático da formação de cavacos para ferros fundidos [23].

-Influência da perlita na matriz

As propriedades mecânicas dos ferros fundidos são diretamente proporcionais à relação perlita versus ferrita, contudo não significa que uma alta porcentagem de perlita leve a um alto consumo de ferramenta de corte.

De acordo com Dawson [22], testes realizados mostram que a vida da ferramenta de corte depende da porcentagem de perlita na matriz e da velocidade de corte, conforme mostra a Figura 2.10. Para materiais com porcentagem de perlita entre 75% a 97,5% a uma velocidade de corte de 150m/min, verifica-se uma vida da ferramenta de corte boa à aceitável, mas o mesmo não acontece quando a velocidade de corte passa para 250m/mim. E próximo a 100% de perlita na matriz, nota-se que a vida da ferramenta de corte é baixa para ambas as velocidades de corte.

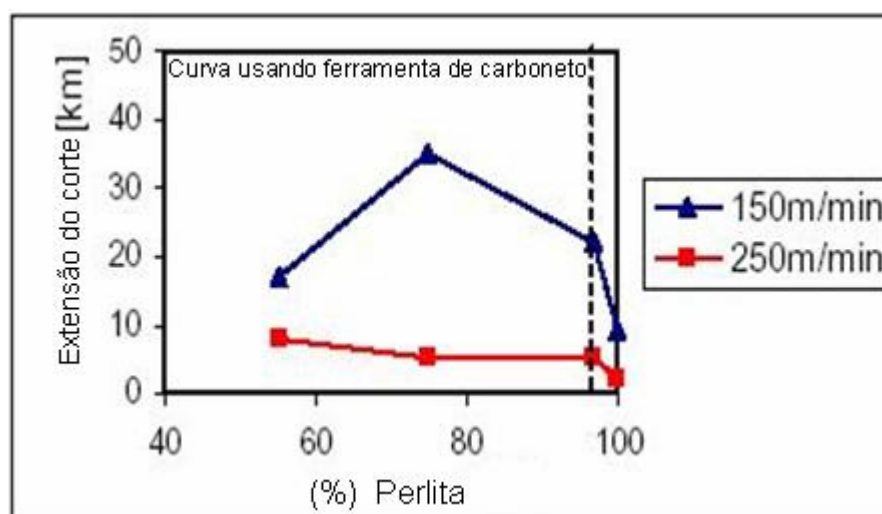


Figura 2.10: Influência da perlita em ferro fundido de grafita compacta e usinado [22].

-Efeito de inclusões.

Inclusões como MnS, normalmente melhoram a usinabilidade dos ferros fundidos, agindo como lubrificantes. A aderência do MnS na superfície da ferramenta de corte cria um filme que lubrifica e protege contra a oxidação e difusão, especialmente a altas velocidades de corte [23].

Estudos realizados [23] mostram que a usinabilidade do ferro fundido cinzento é a mais alta comparada a outros ferros fundidos como o nodular e o de grafita compacta entre outros.

2.5.9.5 Condutividade Térmica do Ferro Fundido Cinzento

A condutividade térmica depende da composição química e da microestrutura do ferro fundido cinzento. Em geral, varia de $40\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ a $59\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. A condutividade térmica aumenta com a quantidade de grafita e de ferrita, porém diminui com a quantidade de perlita e de cementita, varia com a presença de elementos de liga e diminui com o aumento da temperatura. A Tabela 2.3 mostra a propriedade de condutividade térmica dos microconstituintes presentes no ferro fundido [24].

Tabela 2.3: Condutividade térmica dos principais componentes estruturais do ferro fundido [24].

Ferro Componente estrutural	Condutividade Térmica (Wm ⁻¹ K ⁻¹)		
	0-100°C	500°C	1000°C
Grafita	293-419	84-126	42-63
Ferrita	71-80	42	29
Perlita	50	44	-
Cementita	7	-	-

A condutividade térmica de elementos metálicos é relacionada com sua condutividade elétrica. O comportamento da condutividade térmica em elementos metálicos pode ser previsto pela lei de Wiedemann-Franz-Lorenz [24].

Os componentes da liga também representam um papel importante na condutividade elétrica porque o resultado do caminho livre sobre o qual os elétrons são acelerados depende de imperfeições como impurezas, átomos intersticiais e outros defeitos [24]. As adições de liga podem ter o efeito de reduzir a condutividade térmica.

Donaldson e Sohnchen citado em [16], mostram que, o silício aumenta a condutividade térmica, porque forma uma solução sólida com ferro e o alumínio também se comporta da mesma maneira que o silício.

O manganês, níquel e fósforo diminuem a condutividade térmica, enquanto o molibdênio aumenta [16].

A condutividade térmica do ferro fundido cinzento diminuiu com o aumento da temperatura, e para uma extensa faixa de composição química o seu valor é em torno de 1,5 Wm⁻¹K⁻¹ a 1,9 Wm⁻¹K⁻¹, entre 100°C e 450°C [24]. A condutividade térmica do ferro fundido cinzento varia linearmente com a temperatura na faixa de 100°C a 700°C [25].

A Tabela 2.4 mostra valores de condutividade térmica de ferro fundido cinzento [24].

A morfologia da grafita é importante para os resultados da

condutividade térmica, e que a grafita do tipo A, é a que resulta no maior índice de condutividade e quanto maior o tamanho da grafita também maior é o índice de condutividade [18]. O carbono equivalente do ferro fundido também influencia no índice de condutividade térmica, sendo que quanto maior o carbono equivalente maior é o índice para qualquer tipo de ferro fundido [14].

Tabela 2.4: Valores da condutividade térmica de ferro fundido cinzento [24]

Pesquisadores	Composição química (% em peso)			Condutividade térmica (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	
	C Total	Si	outros		
Walton	3,93	1,40	---	55,4(100°C)	46,7(425°C)
	2,92	1,75	---	36,3(100°C)	---
Donaldson	3,20	1,50	---	50,6(100°C)	45,2(400°C)
	3,18	1,59	0,99 Cu	44,4	41,0
	3,18	1,49	1,98 Cu	46,0	38,9
	3,16	1,44	3,10Cu	46,0	41,0
	3,12	2,31	0,54Cr+0,77Mo	49,8	45,6
	2,56	2,20	0,58 Mo	49,4	45,2
Angus	3,98	1,32	0,16Cr+0,31Mo	57,0(100°C)	42,0(400°C)
	2,75	6,49		37,0(100°C)	34,0(430°C)
	2,80	2,50		42,0(100°C)	30,0(430°C)

2.6. Processos de Fundição

A base de todos os processos de fundição consiste em alimentar de metal líquido a cavidade de um molde com o formato requerido, seguindo um resfriamento a fim de produzir um objeto sólido resultante de solidificação. Os vários processos diferem, principalmente na maneira de formar o molde. Em alguns casos, como da moldagem em areia, confecciona-se um molde para cada peça a ser fundida e após a solidificação ele é rompido para remover o fundido, ou seja, para desmoldá-lo. Em outros casos, como por exemplo, na fundição sob pressão, usa-se um molde permanente varias vezes para uma sucessão de fundições,

removendo-se o fundido após cada fundição sem danificar o molde. Em ambos os casos, entretanto, são necessária provisão de metal líquido que preencha todas as partes do sistema e permaneça no local até que a solidificação termine [26].

As etapas básicas e a terminologia podem ser ilustradas considerando a fundição de um objeto simples num molde de areia. Primeiro é necessário um modelo do objeto a ser fundido, pode ser manufaturado com madeira, metal ou outros materiais. O molde é feito por empacotamento de areia em torno do modelo, toda a estrutura deve estar contida numa caixa de moldagem. Se o fundido possuir regiões ocas, são feitos modelos separados denominados machos, que são colocados no interior da cavidade deixada pelo modelo do fundido. O espaço entre a cavidade e o macho será preenchido pelo metal líquido, que solidifica, formando a peça fundida. A provisão de metal é feita pela alimentação do metal líquido por meio de um sistema de canais de alimentação existentes no molde. Terminada a solidificação, a peça fundida é removida do molde por um processo conhecido como desmoldagem, em seguida os machos são extraídos por impacto e os alimentadores são cortados. A areia restante é removida por jateamento e a peça fundida está pronta para as operações de acabamento superficial, denominadas rebarbação [27].

2.6.1 Fusão

Os equipamentos de fusão e de elaboração de metal líquido com as características requeridas são muito importantes na cadeia de obtenção de produtos de fundição, são dispositivos cuja missão é a de fornecer o metal fundido, de qualidade adequada nas quantidades necessárias à temperatura conveniente e ao mais baixo custo [26].

No caso da produção de ferro fundido cinzento utiliza-se na indústria de grande escala o chamado forno de cubilô e os fornos de indução [11].

Um forno bastante usado para a produção de ferro fundido cinzento de grafita lamelar é o forno de indução. Este tipo de forno vai existir cada vez mais nas fundições mais modernas de todo o mundo em função dos fornos cubilô tenderem a desaparecer devido a questões ambientais [27].

Os fornos de indução estão incluídos no grupo de fornos elétricos e se classificam em:

- De resistência elétrica:
 - Aquecimento direto;
 - Aquecimento indireto.
- De arco elétrico:
 - Arco direto;
 - Arco indireto.
- De indução elétrica
 - Baixa frequência;
 - Média frequência;
 - Alta frequência.

Os fornos elétricos de indução são fornos usados para a fusão e refino de várias ligas metálicas e garantem uma grande segurança de operação e também um bom controle técnico das ligas que são elaboradas. O rendimento destes fornos é bom embora tenha que iniciar com uma carga metálica parcialmente líquida obtida em outros fornos auxiliares, no caso de fornos a canal [27].

Subdividem-se em:

- Fornos de indução de baixa frequência (frequência da rede elétrica, 50/60Hz)
- Fornos de indução de média frequência (frequências de até 500Hz)
- Fornos de indução de alta frequência (frequência acima de 500Hz)

Para o seu funcionamento usa-se uma bobina primária, refrigerada por circulação de um fluido, normalmente água tratada, a qual funciona como o primário de um transformador, gerando correntes induzidas no secundário que é o metal ou liga metálica a ser fundida conforme esquema mostrado na Figura 2.11[27].

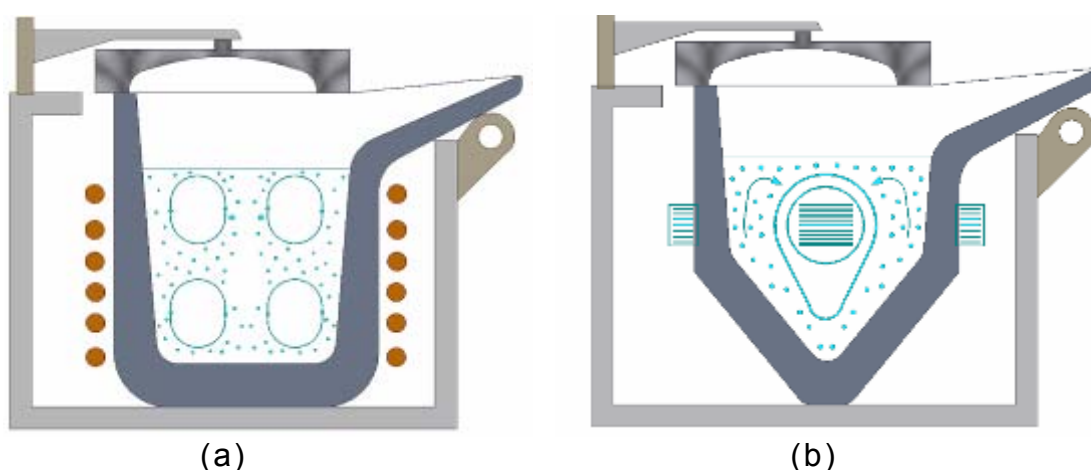


Figura 2.11: Fornos típicos de fundição: a) Forno elétrico de indução b) Forno de indução a canal [27].

Existem fornos de indução a canal, em que o aquecimento do metal em fusão é feito por indução apenas no interior de canais acoplados à base do forno, como mostra a Figura 2.11b [27].

Comparando os fornos de indução de baixa e de alta frequência pode-se dizer que:

- A agitação é maior, quanto mais baixa for a frequência;
- A agitação do banho pode destruir a camada protetora de escória e promover a inclusão de óxidos.

- Na fase de arranque as correntes de alta frequência desenvolvem mais calor que as de baixa frequência.
- Os refratários duram menos tempo nos fornos de baixa frequência, devido à agitação do banho metálico.

As cargas mais utilizadas nos fornos de indução incluem sucata de aço, sucata de ferro fundido, retornos, ferro-silício e carbono, como a moinha de coque. No entanto a carga está sempre relacionada diretamente com o produto que se deseja obter no final [27].

2.6.2 Moldagem

A moldagem mais usada na produção de peças em ferro fundido cinzento é a moldagem em areia verde principalmente devido ao seu baixo custo. Os processos de fundição envolvem o vazamento de ligas metálicas em moldes resistentes a temperaturas acima das temperaturas de fusão dos metais. Devido ao fato dos moldes metálicos, não resistirem ao tempo, ao desgaste erosivo e à fadiga térmica, a maioria das peças são vazadas em moldagens de areia verde obtidas por compactação de uma mistura de areia com aglomerantes, aditivos e certa percentagem de umidade [28].

As principais características requeridas da moldagem são: resistência mecânica, permeabilidade, insensibilidade à umidade, refratariedade, compressibilidade e colapsibilidade.

Resistência mecânica

Quanto à resistência mecânica, dois aspectos devem ser considerados:

- resistência antes do fechamento do molde;
- resistência após o fechamento do molde.

Antes do fechamento do molde, o macho e o molde devem

resistir ao esforço de extração do modelo e da caixa e também aos esforços de manipulação e transporte até seu posicionamento para o vazamento. Após o fechamento do molde, o macho e o molde devem resistir a seu próprio peso e aos esforços estáticos e dinâmicos exercidos pelo metal líquido quando do enchimento da cavidade [27].

Permeabilidade

Permeabilidade de um macho é a propriedade de permitir a passagem de gases. Quando o molde é vazado, o contato da moldagem, com o metal líquido provoca liberação de gases, que pode causar defeitos (bolhas) nas peças. Sendo permeável, o macho facilita a saída dos gases pelas marcações, evitando que os mesmos passem pelo metal. A permeabilidade é uma qualidade indispensável aos machos, sobretudo aos internos [27].

Insensibilidade à umidade

Antes ou depois de posicionados nos moldes, os machos podem absorver umidade da atmosfera ou da própria areia do molde. O aumento do teor em água pode reduzir a coesão dos grãos de areia do macho e do molde, causando sua desagregação e aumentar a quantidade de gases desprendidos quando do vazamento nos moldes [27].

Refratariedade

Refratariedade de um molde é a propriedade que traduz a sua resistência a temperaturas elevadas. Esta é uma qualidade importante, pois durante um tempo variável, segundo sua localização o macho e o molde sofrem os efeitos da elevada temperatura do metal líquido, seja por radiação durante o enchimento, seja por contato direto [27].

Compressibilidade

Devido ao fenômeno de contração das ligas no estado sólido, as dimensões das peças de fundição diminuem durante o seu resfriamento. Em consequência disso os machos internos sofrem esforços de compressão, se os machos forem resistentes e não cederem, as peças pode trincar ou romper. Assim, os machos devem ser compressíveis, ou seja, devem ceder aos esforços de compressão que ocorrem devido à contração do metal no estado sólido [27].

Colapsibilidade

Uma moldagem tem boa colapsibilidade quando ele perde a resistência mecânica após a solidificação da peça. Exige-se esta característica dos machos para que, quando da limpeza das peças, a desmoldagem seja fácil favorecendo a remoção da areia dos machos internos [27].

Quanto aos materiais de moldagem, podem ser usados nos processos de fabricação de machos e moldes para a produção de ferro fundido cinzento. Estes processos incluem areia verde, casca, caixa quente, dióxido de carbono e cura a frio. O tipo de macho e molde não tem que estar necessariamente relacionado com o material da moldagem. A seleção do material do macho e molde depende do seu tamanho, complexidade, tolerância dimensional e custo [28].

2.6.3 Resina Fenólica de Cura a Frio

O PNB ("Phenol No-Bake" cura a frio fenólica) é um ligante constituído por um catalisador ácido e uma resina do tipo fenólica reativa, possui elevada resistência ao calor e uma boa consistência, pode ser utilizada para fazer todo o tipo de moldagem para vazamentos de metal. Pode ser usado para todos os tamanhos de peças [28].

A quantidade de resina fenólica normalmente é cerca de 0,4% a 2,0% em peso total da areia. Os níveis de catalisador são geralmente entre 20% a 50% em peso do total do ligante. Como em todos os sistemas auto-secantes, a temperatura é um fator importante, uma vez que o componente catalisador necessita de temperatura para iniciar e manter a reação química da cura [28].

A função do ácido catalisador dos PNB é de neutralizar os contaminadores alcalinos na areia. Depois se inicia e mantém a cura de condensação e a reação das ligações químicas. A reação de condensação da PNB produz água que tende a reduzir a velocidade da cura, isto faz com que a união (macho/molde) da areia cure de fora para dentro e a areia exposta ao ar cure primeiro que a de dentro [27].

Os ácidos catalisadores mais comuns são em ordem de aumento de reatividade: 85% fosfórico, tolueno sulfônico, xileno sulfônico, e benzeno sulfônico. Todos os tipos de ácidos catalisadores são transportados em água, e os do tipo sulfônicos costumam conter também percentagens de álcool [28].

2.6.4 Tratamentos Térmicos

Os principais tratamentos térmicos a que os ferros fundidos cinzentos podem ser submetidos são: o recozimento de alívio de tensão, o recozimento de amaciamento, têmpera e revenimento [29].

2.6.4.1 Recozimento de Alívio de Tensão

No estado bruto de vazamento, os ferros fundidos estão sujeitos a tensões residuais em virtude da velocidade de resfriamento e das seções das peças serem diferentes, se o resfriamento ocorrer integralmente na moldagem em areia, estas tensões poderão ser de pequena intensidade, mas não é geralmente o procedimento utilizado, as tensões residuais reduzem

a resistência das peças e provocam distorções que podem induzir trincas nas peças [20].

2.6.4.2 Recozimento de Amaciamento

Podem-se distinguir três tipos de recozimento de amaciamento dos ferros fundidos cinzentos, em função das temperaturas máximas atingidas durante o ciclo térmico: recozimento de alta temperatura (com grafitização dos carbonetos), de média temperatura (com dissolução da perlita no campo austenítico e posterior transformação em ferrita) e de baixa temperatura (com decomposição da perlita no campo ferrítico) [20].

2.6.4.3 Têmpera e Revenimento

A execução de uma têmpera sobre peças de ferro fundido implica numa austenitização a uma temperatura 50 °C a 100°C superior a Ac1; esta temperatura pode ser determinada através da relação empírica dada pela eq. (2.13)[20].

$$Ac1 (\text{°C}) = 730 + 28,0. (\%Si) - 25,0. (\%Mn) \quad (2.13)$$

Ac1 indica a temperatura de início da austenitização, isto é, a entrada no campo “ $\alpha+\gamma$ +grafita” do diagrama de equilíbrio da liga.

Para a execução de uma têmpera, a microestrutura do ferro fundido deve estar isenta de ferrita (aproximadamente 50°C acima de Ac1). A elevação da temperatura de austenitização do ferro fundido no campo “ γ +grafita” enriquece progressivamente a austenita em carbono, o que significa o aumento do risco de distorção e trinca das peças, bem como aumento da fração de austenita residual após têmpera [20].

3. Materiais e Métodos

O presente trabalho foi desenvolvido na empresa Voith Paper no Brasil, seguindo o processo de fabricação de cilindros secadores utilizados em máquina de produção de papel, sendo estes produzidos pela referida empresa. Os equipamentos e procedimentos utilizados estão descritos a seguir.

3.1 Preparação do Metal

O processo de fabricação das ligas de ferro fundido cinzento, estudadas constituiu inicialmente em carregar o forno utilizando como carga: o ferro gusa, a sucata de aço, carburante e retorno. À medida que a carga se funde, o carregamento deve ser completado até atingir o peso final para o vazamento, pré-definido em projeto, durante essa etapa retira-se uma amostra do material para análise química e em função desses resultados realizam-se as correções de composição necessárias.

Após o acerto da composição química desejada, pode ser feito o tratamento de inoculação quando necessário e a operação de vazamento no molde.

Deve-se ter cuidado com o superaquecimento do banho por um período prolongado, devido ao seu efeito na redução do grau de nucleação do ferro fundido [18].

A fusão das ligas de ferro fundido cinzento foi realizada em fornos elétricos de indução de baixa frequência, cujas características estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Características do forno elétrico de indução utilizado.

Fabricante	Capacidade (tonelada)	Potência (KW)	Frequência (Hz)
Demag	13	3000	60

Foram utilizadas duas painelas para vazamento do metal líquido do cilindro secador e uma para a transferência do metal, descritas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Painelas de vazamento e transferência.

Painela N°	Fabricante	Peso (tonelada)	Função	Capacidade (tonelada)
15	Voith	10,8	Vazamento	25
13	Sessenbrenner	17	Vazamento	36
14	Gazzola	6,8	Transferência	15

3.1.1 Carregamento do Forno

A carga do forno usada para a fabricação do ferro fundido para produção dos cilindros secadores utilizados em máquinas de produção de papel, está indicada na Tabela 3.3.

Caso não haja quantidade suficiente de retornos (canais e massalotes) pode-se completar a carga com ferro gusa desde que a quantidade não ultrapasse 15% da carga. Para tanto a quantidade de sucata de aço e carburante devem ser recalculadas de forma a obter uma composição química mais próxima da desejada.

O carregamento do forno pode ser feito partindo-se de uma carga líquida, proveniente de sobra ou transferência de metal de outro forno, desde que seja conhecida a sua composição química.

Após o carregamento do forno é retirada uma primeira amostra do metal líquido a uma temperatura acima de 1400°C até 1450°C., para análise da composição química do metal a ser vazado.

O metal do forno é transferido para uma panela para limpeza da escória formada no banho e os materiais de correção calculados são adicionados no forno antes de retornar o metal da panela.

Tabela 3.3: Carga do forno.

Material da carga	Quantidade (% em peso)
Chapas de aço	20
Moinha de coque	1,5
Cavaco, ferro Gusa, retorno.	78,5

3.1.2 Matéria Prima Utilizada

A Tabela 3.4 mostra as matérias primas utilizadas e suas respectivas composições químicas. Para a fabricação do ferro fundido cinzento, deve-se obter, após o carregamento do forno e correções, a análise química na panela de vazamento.

Dessa forma, este trabalho teve como principal objetivo produzir, testar e comparar os cilindros secadores de ligas de ferro fundido cinzentos comerciais com as duas novas ligas propostas.

A análise química das ligas foi realizada pela Voith Paper no Brasil. Os elementos Cr, Ni, Mo, Si, Mn, Cu e P foram determinados por espectrometria de emissão ótica, utilizando um equipamento da marca ARL, modelo Termo ARL MA. Os elementos C e S foram determinados utilizando um analisador de gases da marca Leco, modelo TC 136.

Tabela 3.4: Matérias-primas utilizadas e a composição química.

Material	Composição química (%em peso)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
Chapa-aço	0,15	0,15	0,9	0,020	0,015				
Retornos	3,30	1,75	0,75	0,065	0,045	0,22	0,15	0,2	
Fe-Gusa	4,25	1,1	0,12	0,07	0,01				
FeSi	0,1	0,75		0,030					
FeMnAC	7,5		0,75						
FeCrAC	7,5	3,0		0,030		53			
FeP		0,72	0,3	17,3	0,38	0,5			
FeS					38				
FeMo									60
Níquel							100		
Coque	45				1,5				
Petróleo	85				1,5				
Grafita	75								
SiC	27	63							
Cobre								100	

A Tabela 3.5 mostra as composições químicas planejadas das ligas dos ferros fundidos cinzentos utilizados neste trabalho. As ligas de ferro fundido ENGJL350 [2] e o SA278CL50 [3] são as propostas nesse trabalho, pois até hoje essas ligas nunca foram usadas para a fabricação de cilindros secadores utilizados em máquinas de produção de papel, porque essas ligas seriam mais adequadas para máquinas de grande porte.

Tabela 3.5: Composição química planejada das ligas dos ferros fundidos cinzentos.

Liga	Composição química no forno (% em peso)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo
ENGJL250	3,30	1,45	0,75	0,065	0,050	0,18			
	a	a	a	a	a	a			
	3,37	1,50	0,85	0,12	0,10	0,30			
ENGJL300	3,18	1,60	0,75	0,065	0,050	0,30	0,65		
	a	a	a	a	a	a	a		
	3,28	1,70	0,85	0,12	0,10	0,35	0,85		
* ENGJL350	3,18	1,65	0,75	0,065	0,050	0,30	0,85	0,15	0,18
	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	3,25	1,75	0,85	0,12	0,10	0,40	1,00	0,20	0,22
SA278CL35	3,35	1,50	0,75	0,065	0,050	0,15			
	a	a	a	a	a	a			
	3,45	1,65	0,85	0,12	0,10	0,40			
SA278CL40	3,25	1,45	0,75	0,065	0,050	0,30			
	a	a	a	a	a	a			
	3,40	1,55	0,85	0,12	0,10	0,35			
SA278CL45	3,25	1,60	0,75	0,065	0,050	0,40	0,50	0,15	
	a	a	a	a	a	a	a	a	
	3,40	1,70	0,85	0,12	0,10	0,45	0,70	0,25	
* SA278CL50	3,15	1,60	0,75	0,065	0,050	0,40	0,80	0,15	0,15
	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	3,30	1,70	0,85	0,12	0,10	0,45	1,00	0,20	0,20

* ligas de ferro fundido cinzento propostas

3.1.3 Inoculação

Depois de efetuada a correção da composição química de acordo com as faixas de valores previstos para cada elemento, o metal foi transferido para a panela de vazamento.

O metal foi aquecido e atingindo a temperatura de 1450°C foi transferido para a panela. A panela de vazamento não precisa ser previamente aquecida, entretanto deve estar livre de incrustações de metal e ou escória nas bordas e na bica.

A quantidade de inoculante utilizada foi 0,20% em peso do vazamento do cilindro secador e as especificações estão apresentadas na Tabela 3.6. A inoculação é normalmente feita colocando-se o material a ser adicionado no fluxo de metal líquido ao bascular o forno.

No caso de cilindros secadores com peso de vazamento acima de 20 toneladas, a quantidade total de inoculante é dividida, sendo que uma parte é colocada no fluxo de metal e outra parte na panela de transferência de metal do forno para a panela de vazamento. O tempo de “fading” do inoculante foi em torno de 15 a 20 minutos.

Tabela 3.6: Especificação do inoculante utilizado.

Material	Fornecedor	Gran. (mm)	Composição química (% em peso)			
			Si	Ca	Al	Sr
Ultrasilicon	Inonibrás	3-8	76,64	0,03	0,12	1,19

3.1.4 Vazamento

Após a transferência do metal para a panela de vazamento, a escória formada foi removida. Uma amostra final é retirada e a temperatura do metal na panela não deve estar abaixo de 1370°C.

No caso de cilindros secadores com peso de vazamento acima de 25 toneladas, a remoção da escória bem como a retirada da amostra final deve ser feita no local de vazamento com temperatura de vazamento em torno de 1340°C±10°C.

A Tabela 3.7 mostra as propriedades mecânicas: limite de resistência (R_m) e dureza desejada, das ligas em estudo, especificados segundo norma [2, 3].

Tabela 3.7: Propriedades Mecânicas Especificadas. [2, 3]

Liga	R _m (MPa)	Dureza (HB)
ENGLJ250	190	195 ± 25
ENGLJ300	225	195 ± 25
ENGLJ350*	260	195 ± 25
SA278CL35	193	195 ± 25
SA278CL40	221	205 ± 15
SA278CL45	248	205 ± 15
SA278CL50*	276	205 ± 15

*ligas de ferro fundido cinzento propostas

3.2. Processo de Moldagem de Cilindros Secadores

O processo de moldagem do cilindro secador foi realizado segundo especificações técnicas internas da empresa de fundição Voith e as normas EN [2] e ASTM [3]. A moldagem do cilindro secador é dividida em duas etapas: preparação do poço e a moldagem. A Figura 3.1 mostra um desenho esquemático do sistema de moldagem de cilindros secadores, utilizado neste trabalho.

Os moldes dos cilindros são feitos em camisas de aço ASTM 1020 calandradas com um diâmetro pré-determinado, de forma que possa fundir cilindros de diâmetro de 1800mm e 1500mm e comprimento até 12m.

As camisas recebem primeiramente um revestimento de placas refratárias de espessura média de 35mm, em seguida é feito o assentamento de tijolos de ferro fundido cinzento (ENGJL150) [2], com o objetivo de resfriar mais rapidamente a parede da peça fundida, dimensões 60x100x85mm, juntamente com argamassa refratária, utilizando um misturador de argamassa

da marca Putzmaester, modelo P240, com capacidade de projetar 5 t/h.

O molde (poço) é aquecido para secagem através de um aquecedor de 1500 KW da marca Pyro modelo 1500 que gera e sopra ar quente por uma tubulação até a parte inferior do poço por aproximadamente 12 horas a uma temperatura média de 200°C. A cada referência, se faz necessário ajustar a altura do molde fazendo uma base de concreto com a altura desejada. É feito o controle dimensional e pintura do molde com tinta contendo grafite a base de água, e secado por aproximadamente 10 horas à 200°C.

Uma das características desta moldagem é permitir o vazamento de várias peças consecutivas, bastando que se façam reparos e nova pintura.

Para a elaboração do macho foi utilizado um misturador contínuo de areia da marca Turbomix, modelo AH 18 com capacidade de preparar até 20t/h de areia de cura a frio. Este macho após pintura com tinta refratária à base de zirconita diluída em álcool será utilizado gerando o diâmetro interno do cilindro secador.

A montagem se dá com a centragem do macho, colocação da tampa de vazamento e os respectivos canais refratários distribuídos igualmente no diâmetro do molde pelo sistema denominado "CHUVEIRO" (fundido pela parte de cima da peça). Porém, neste caso o metal desce junto à parede do molde para evitar a lavagem do macho. Por fim foi fixado todo o conjunto de moldagem para evitar que o macho se movimente devido ao empuxo do metal líquido.

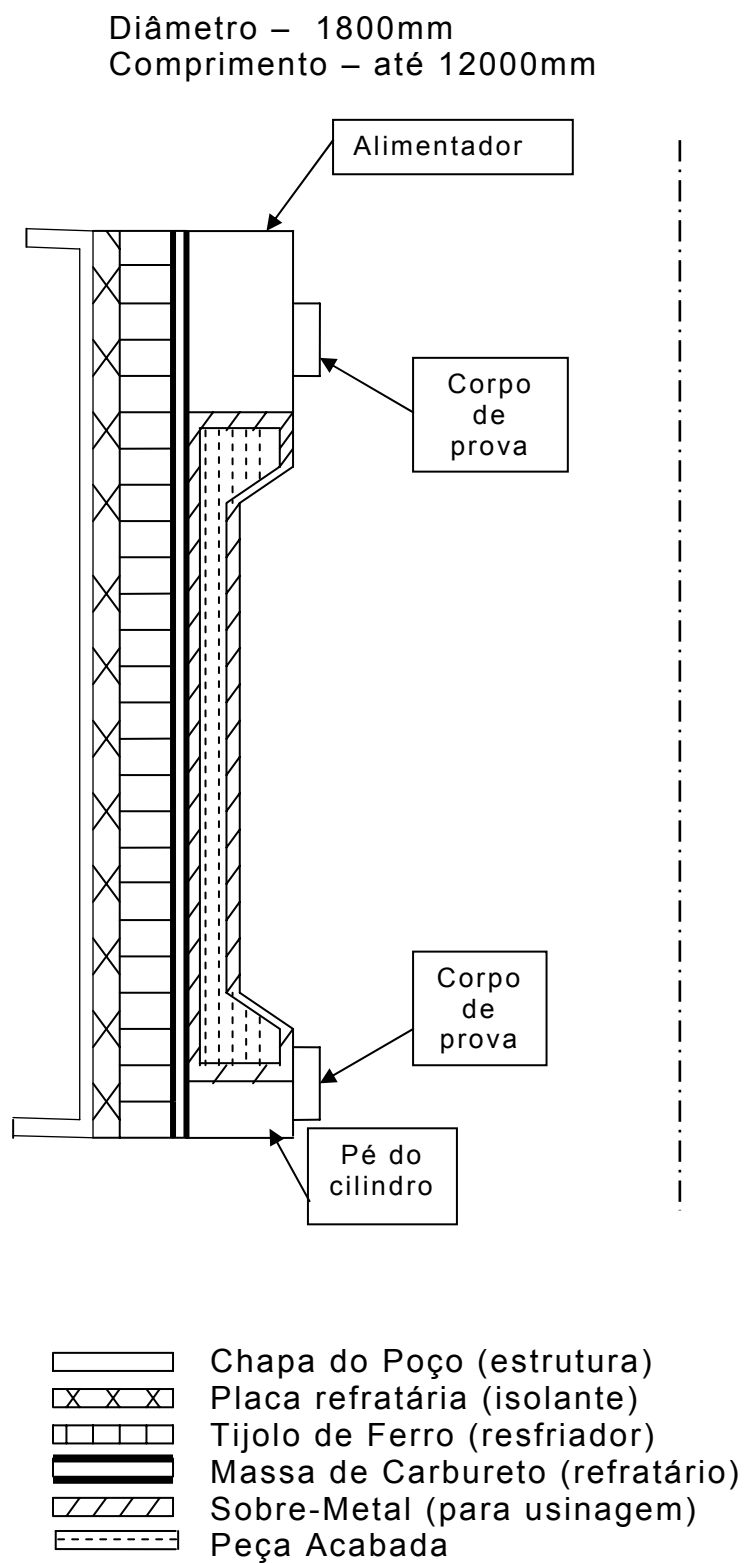


Figura 3.1: Desenho esquemático do sistema de moldagem de cilindros secadores

O vazamento ocorre com a temperatura do metal em $1340^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ com um tempo de vazamento de 70 segundos, com peso de vazamento variando de 10 toneladas até 30 toneladas.

A desmoldagem foi feita após 72 horas, onde a velocidade de resfriamento dentro do molde deve ser menor que $30^{\circ}\text{C}/\text{h}$, já promovendo o tratamento térmico de alívio de tensões. A areia do macho deve sair junto com a peça deixando o molde (poço) totalmente vazio, depois foi feita a retirada do macho, fazendo que a areia caia diretamente no desmoldador vibratório “shakeout”.

3.3 Determinação das Propriedades Mecânicas

3.3.1 Ensaio de Tração

A resistência à tração foi determinada através do parâmetro limite de resistência (R_m), segundo a norma DIN EN 10 002-1:1990 [4] para ensaio de tração em materiais metálicos a temperatura ambiente, a partir de corpos de prova (cp) do tipo A, conforme EN 1561 [2], os corpos de prova foram retirados dos cilindros secadores no estado bruto (antes da usinagem).

Do mesmo modo, cilindros secadores fabricados para atender a norma ASME[30], os ensaios foram realizados conforme ASTM SA 278M:2004 [3].

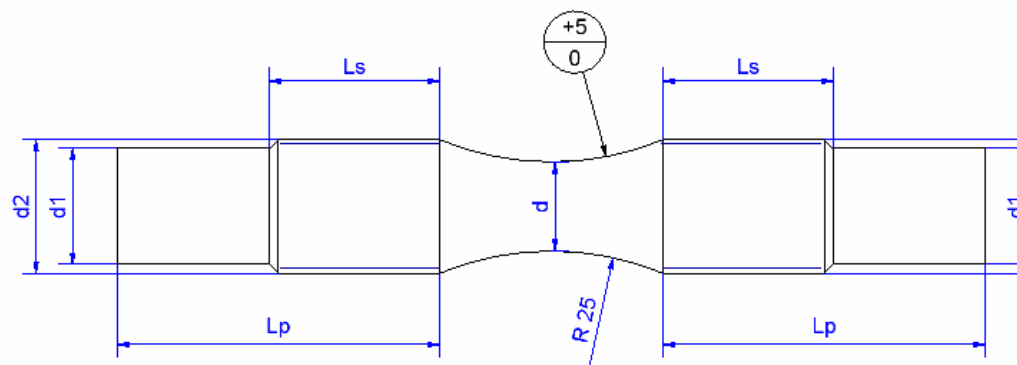
Para as classes das ligas ENGJL 300 e ENGJL 350 de acordo com a AD MERKBLAT [31], são exigidos ensaios de tração nas duas extremidades do cilindro secador.

O equipamento utilizado foi uma máquina de ensaio universal para ensaios de tração, da marca Wolpert–Amsler, modelo SM2350, usando uma célula de carga de 1000KN calibrada conforme a norma: ABNT NBR NM ISO 7500-1[32].

A velocidade de aumento de tensão foi de 8 a $10\text{Nmm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, e

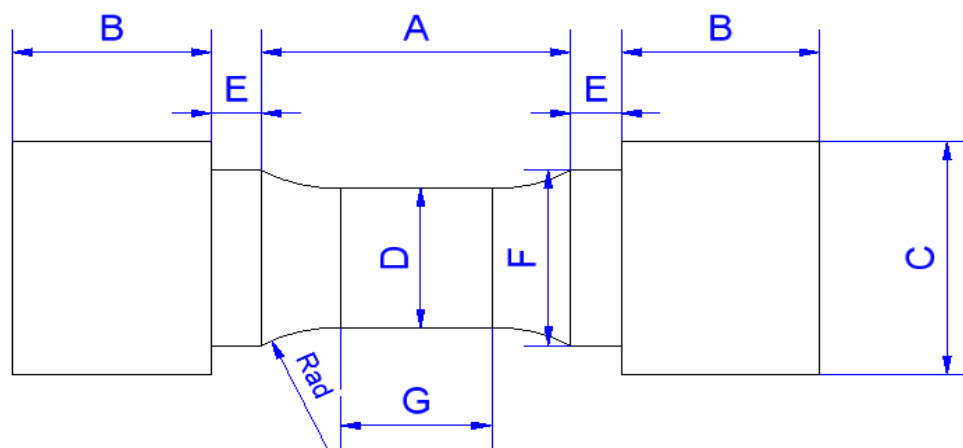
temperatura 20 a 22°C, atendendo a determinação da referida norma.

A Figura 3.2 mostra esquematicamente o corpo de prova utilizado no ensaio de tração.



$d=20\text{mm}\pm 0,1\text{mm}$; $d1=26,5\text{mm}$; $d2=M30\text{mm}$; $Ls=36\text{mm}$; $Lp=45\text{mm}$.

(a)



$D=31,7\text{mm}\pm 0,6\text{mm}$; $F=36,5\text{mm}$; $C=M47\text{mm}$; $B=36\text{mm}$; $A=57\text{mm}$; $E=8\text{mm}$, $G=32\text{mm}$

(b)

Figura 3.2: Corpo de prova utilizado no ensaio de tração. (a) especificação da EN [2]. (b) especificação da norma ASTM [3].

A Figura 3.3 mostra as posições na qual foram retirados os três corpos de prova fundidos em apenas um cilindro secador,

para a realização dos ensaios de tração, condutividade térmica e caracterização microestrutural.



Figura 3.3: Cilindro secador indicando as posições de retirada dos corpos de prova

3.3.2 Medidas de Dureza

A dureza Brinell foi determinada segundo as normas ABNT–NBR NM 187-2[33] e ISO 6506-2[34]. Os resultados foram obtidos a partir de 3 impressões sobre a superfície dos lados superior e inferior de cada cilindro secador analisado, com a devida preparação da superfície.

O equipamento utilizado foi um durômetro da marca Ernest, modelo Hammer, calibrado através de blocos de referência conforme a norma DIN EN ISO 6506-2 [34], através de bloco de referência MPA calibrado conforme DIN EN ISO 6506.

3.4 Caracterização Microestrutural

A caracterização microestrutural foi realizada em um ou dois corpos de prova retirados dos cilindros secadores, conforme requerido pela norma [31]. E foi utilizado um microscópio ótico com sistema de análise de imagem acoplado.

3.4.1 Preparação das Amostras

As amostras foram preparadas de acordo com a norma ASTM E3-95[6]. Inicialmente as amostras foram cortadas com disco abrasivo sob refrigeração, utilizando uma cortadeira do tipo “cut-off”, em seguida as amostras foram lixadas em politriz com lixa de granulometria variando de 180 a 1200 mesh.

Posteriormente, as amostras foram polidas com alumina de 1 μm e 0,3 μm e lavadas com álcool isopropílico em banho ultrassônico e secadas em jato de ar quente. O ataque químico foi realizado com ácido nítrico diluído em álcool 2,5% (Nital), para observação da matriz metálica. O ataque consistiu na imersão da amostra no reagente, cujo tempo médio de ataque foi de 30 segundos e temperatura em torno de 22°C.

3.4.2 Microscopia Ótica

O equipamento utilizado foi microscópio ótico da marca Leitz, modelo Ortoplan, acoplado a uma câmera de vídeo. A caracterização da morfologia da grafita (forma, tipo e tamanho) foi segundo a norma DIN EN ISO 945:1994[17].

3.5 Condutividade Térmica

A condutividade térmica foi calculada a partir dos resultados obtidos nos ensaios de difusividade térmica, através da eq (3.1).

Os ensaios de difusividade térmica foram realizados no

laboratório, LABMAT, da Marinha do Brasil, ARAMAR, utilizando um difusímetro, modelo Quadruflash 1200.

Os corpos de prova eram cilíndricos com diâmetro de 25mm, espessura de 3mm e com as duas superfícies lixadas. Os corpos de prova foram confeccionados a partir dos corpos de prova usados nos ensaios de tração, porém fora da área a que foi submetido aos esforços durante os ensaios.

As temperaturas de ensaio foram 100°C, 150°C e 200°C. Os ensaios foram realizados a 100°C por esta ser a usada para os cálculos de projeto, a temperatura de 200°C é a máxima que um cilindro secador trabalha e 150°C foi uma temperatura adicional para observar se a condutividade térmica tenderia a um comportamento linear com o aumento da temperatura.

A conversão da difusividade térmica em condutividade térmica foi realizada usando a eq. (3.1) [25].

$$CT = DT \times d \times ce \quad (3.1)$$

onde:

CT= condutividade térmica, $Wm^{-1}K^{-1}$;

DT= difusividade térmica, m^2/s ;

d = densidade do material, kg/m^3 [25];

ce= calor específico do ferro fundido, $Jkg^{-1}K^{-1}$ [25].

3.6 Cálculo de Espessura do Cilindro Secador

Este trabalho vem propor outras classes de ligas com melhores relações de peso, pressão, tamanho e velocidade, mantendo o ferro fundido cinzento como material a ser usado e para isso foi necessário determinar a espessura mínima de parede do cilindro secador.

Sendo o cilindro secador um vaso de pressão, é necessário

calcular a espessura mínima, tendo como pré-condição os valores teóricos de propriedades mecânicas, físicas e térmicas das ligas utilizadas.

Os cálculos utilizados na determinação da espessura da parede obedeceram aos critérios descritos no Anexo A.

4. Resultados e Discussões

4.1 Caracterização das Ligas dos Cilindros Secadores.

Todas as caracterizações das ligas usadas neste trabalho foram realizadas em amostras retiradas de três diferentes cilindros secadores da mesma classe de material, para verificar a reprodutibilidade dos resultados, demonstrando que as condições empregadas no processo usual de fabricação garantem as mesmas características para os cilindros secadores produzidos.

4.1.1 Composição Química

A Tabela 4.1 apresenta as composições químicas das ligas dos ferros fundidos cinzentos estudados e observa-se que os resultados obtidos estão alinhados com as composições químicas planejadas e descritos na Tabela 3.5.

Apesar de a composição química planejada prever a adição de molibdênio para as ligas ENGJL350 e SA278CL50, este não foi adicionado, observado a presença de traços desse elemento, proveniente da sucata empregada, contudo os resultados mecânicos mostram-se satisfatórios em relação aos valores de resistência mecânica obtidos.

A Tabela 4.2 mostra as composições químicas obtidas em três cilindros secadores da liga SA278CL50, nos quais o teor de molibdênio obtido está de acordo com o proposto para a composição química planejada, descrito na Tabela 3.5.

Uma característica importante é que, na fundição da Voith, usa-se uma grande porcentagem de materiais reciclados (cavacos) da própria usinagem, em função da elevada qualidade, sem riscos de contaminação por materiais deletérios, levando a uma diminuição nos custos.

O carbono equivalente (CE), calculado através da equação(9) indica que todas as ligas estudadas são hipoeutéticas e com microestruturas predominantemente previstas segundo o diagrama de equilíbrio binário Fe-C.

Tabela 4.1: Análise química obtida para cada liga.

Liga	Composição química (% em peso)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo
ENGJL250	3,34	1,47	0,79	0,066	0,050	0,28	0,23	0,15	0,02
	3,32	1,49	0,80	0,069	0,051	0,30	0,24	0,10	0,03
	3,34	1,46	0,76	0,066	0,049	0,27	0,28	0,14	0,02
ENGJL300	3,23	1,69	0,80	0,070	0,072	0,30	0,78	0,13	0,02
	3,23	1,69	0,81	0,069	0,067	0,30	0,78	0,13	0,02
	3,20	1,62	0,79	0,070	0,070	0,33	0,84	0,15	0,02
* ENGJL350	3,20	1,74	0,78	0,066	0,073	0,33	0,81	0,26	0,05
	3,20	1,74	0,78	0,066	0,073	0,33	0,81	0,26	0,05
	3,22	1,69	0,77	0,069	0,069	0,33	0,84	0,16	0,03
SA278CL35	3,39	1,60	0,79	0,064	0,046	0,40	0,46	0,09	0,02
	3,41	1,63	0,78	0,071	0,058	0,40	0,25	0,17	0,03
	3,41	1,52	0,78	0,071	0,058	0,29	0,42	0,13	0,02
SA278CL40	3,30	1,48	0,81	0,069	0,053	0,30	0,45	0,20	0,05
	3,35	1,54	0,79	0,067	0,057	0,32	0,27	0,11	0,02
	3,30	1,50	0,80	0,062	0,062	0,30	0,52	0,12	0,03
SA278CL45	3,35	1,65	0,77	0,065	0,052	0,42	0,67	0,21	0,05
	3,33	1,65	0,81	0,067	0,055	0,38	0,64	0,20	0,06
	3,29	1,65	0,79	0,067	0,051	0,36	0,65	0,21	0,04
* SA278CL50	3,19	1,62	0,82	0,066	0,056	0,39	0,81	0,12	0,02
	3,25	1,60	0,80	0,074	0,050	0,36	0,81	0,18	0,02
	3,25	1,62	0,81	0,073	0,052	0,38	0,85	0,12	0,02

*ligas de ferro fundido cinzento propostas

Tabela 4.2: Composição química para a liga SA278CL50 contendo Mo.

Liga	Composição química (% em peso)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo
* SA278CL50	3,22	1,61	0,84	0,064	0,062	0,40	0,86	0,22	0,19
	3,25	1,63	0,79	0,066	0,058	0,40	1,00	0,32	0,20
	3,24	1,63	0,81	0,066	0,050	0,37	0,88	0,24	0,16

*ligas de ferro fundido cinzento propostas

4.1.2 Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas determinadas estão apresentadas nas Tabelas 4.3 e 4.4 e mostram que os resultados de resistência à tração e dureza são valores típicos usados na fabricação de cilindros secadores, observa-se também que todos os valores obtidos de propriedades mecânicas estão acima dos valores especificados por normas [2, 3] e de projeto para dureza.

Tabela 4.3: Valores de limite de resistência das ligas.

Liga	**R _m [2, 3] (MPa)	**R _m (MPa)
ENGJL250	190	234
		232
		235
ENGJL300	225	263
		260
		237
ENGJL350*	260	296
		268
		267
SA278CL35	193	233
		227
		229
SA278CL40	221	237
		239
		244
SA278CL45	248	257
		263
		268
SA278CL50*	276	285
		279
		279

*ligas de ferro fundido cinzento propostas; **R_m = limite de resistência

Os resultados obtidos e apresentados são referentes aos corpos de prova (cps) especificados pela EN [2], ou especificados pela ASTM [3].

Os resultados dos ensaios para os materiais referenciados na EN [2], quando provenientes de corpos de prova em apenso, devem atingir no mínimo 75% da resistência especificada para a sua classe.

Os valores de dureza não são normalizados, contudo são valores exigidos no projeto, porque estes cilindros secadores trabalham sendo raspados por réguas metálicas, de menor dureza, destacando a folha de papel do cilindro secador. A relação resistência em função da dureza fica também em acordo com o demonstrado na Figura 2.8.

Tabela 4.4: Valores de dureza das ligas.

Liga	Dureza de projeto (HB)	Dureza medida (HB)
ENGJL250	195±25	194±2 198±3 191±3
ENGJL300	195±25	203±2 209±4 198±2
ENGJL350*	195±25	196±3 204±2 201±2
SA278CL35	195±25	195±2 190±3 198±3
SA278CL40	205±15	194±3 198±4 200±3
SA278CL45	205±15	199±2 201±3 205±4
SA278CL50*	205±15	206±2 202±3 208±3

*ligas de ferro fundido cinzento propostas

A Tabela 4.5 mostra os resultados da resistência à tração e dureza para os corpos de prova com adição de Mo na composição da liga, onde os resultados observados não diferem de modo significativo

das ligas sem a adição de Mo para a liga SA278CL50, demonstrando que é possível obter uma economia na fabricação do cilindro secador.

Tabela 4.5: Valores de limite de resistência e dureza da liga com adição de molibdênio.

Liga	Dureza (HB)	**R _m (MPa)
SA278CL50*	208±2	292
	205±3	288
	201±3	279

*liga de ferro fundido cinzento proposta; **R_m = limite de resistência.

4.1.3 Análise Microestrutural

Todas as ligas, dos ferros fundidos cinzentos, estudadas apresentaram uma microestrutura com matriz perlítica e grafita predominantemente do tipo A, os microconstituintes presentes são típicos de ligas empregadas na fabricação de cilindros secadores.

Tanto as propriedades mecânicas como a grafitização são decorrentes de um processo de fundição onde a velocidade de resfriamento garante a formação de grafita do tipo A.

Uma inoculação eficaz também garante a formação de grafita do tipo A, enquanto que uma inoculação ineficiente levaria a uma redução da grafita do tipo A e maior formação de grafita do tipo D e E, reduzindo tanto as propriedades mecânicas como a condutividade térmica.

Quando a velocidade de resfriamento é alta é normal o aparecimento de grafita do tipo D, esses veios de grafita são menores e vêm sempre associados ao aparecimento de ferrita livre no contorno da grafita, reduzindo a resistência à tração e a dureza.

A grafita do tipo E tem distribuição orientada e pode provocar um aumento na resistência à tração, porém levando a uma redução na condutividade térmica, devido ao tamanho e distribuição da

grafita.

Dessa forma, pode-se observar que as propriedades mecânicas determinadas estão de acordo com a microestrutura obtida.

As micrografias mostradas nas Figuras 4.1 a 4.10 indicam estruturas típicas e representativas dos materiais analisados. As imagens foram observadas através de um sistema de análise de imagens.

As micrografias apresentadas nas Figuras 4.1a e 4.1b mostram as microestruturas típicas para a liga ENGJL250, as Figuras 4.2a e 4.2b, para a liga ENGJL300, as Figuras 4.3a e 4.3b para a liga ENGJL350, as Figuras 4.4a e 4.4b para a liga SA278CL35, as Figuras 4.5a e 4.5b para a liga SA278CL40, as Figuras 4.6a e 4.6b para a liga SA278CL45 e as Figuras 4.7 a e 4.7b para a liga SA278CL50.

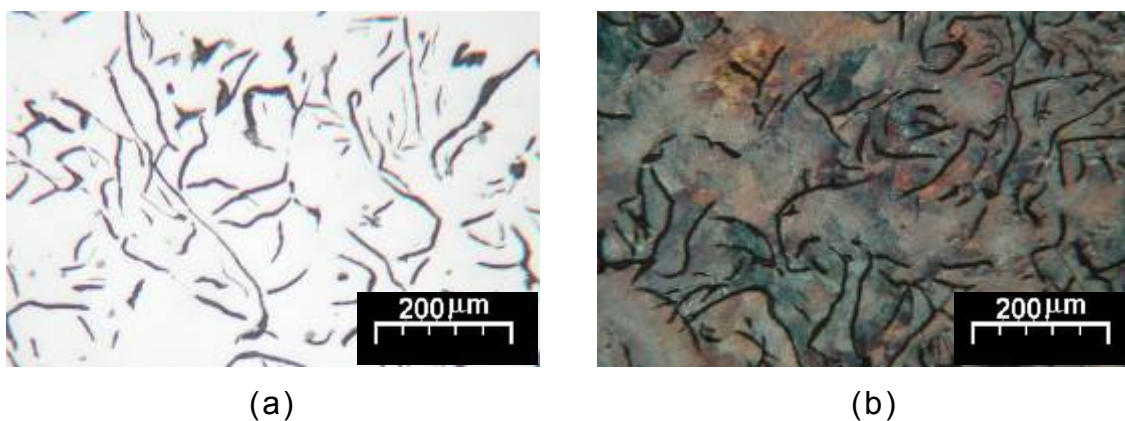
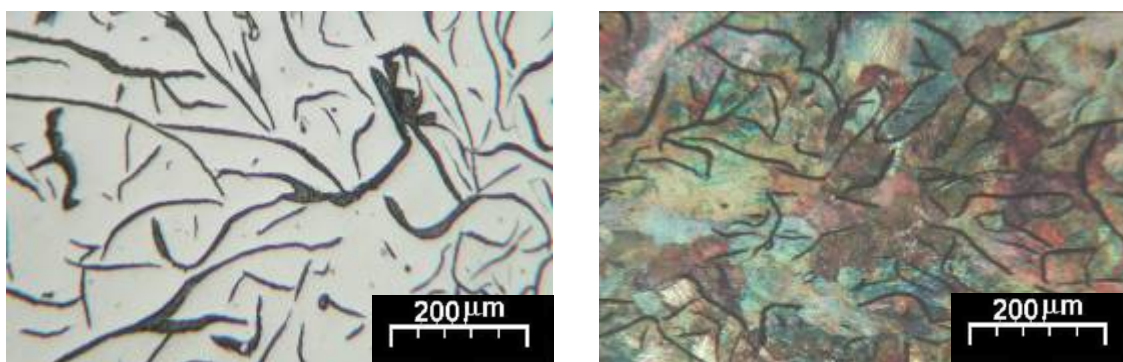


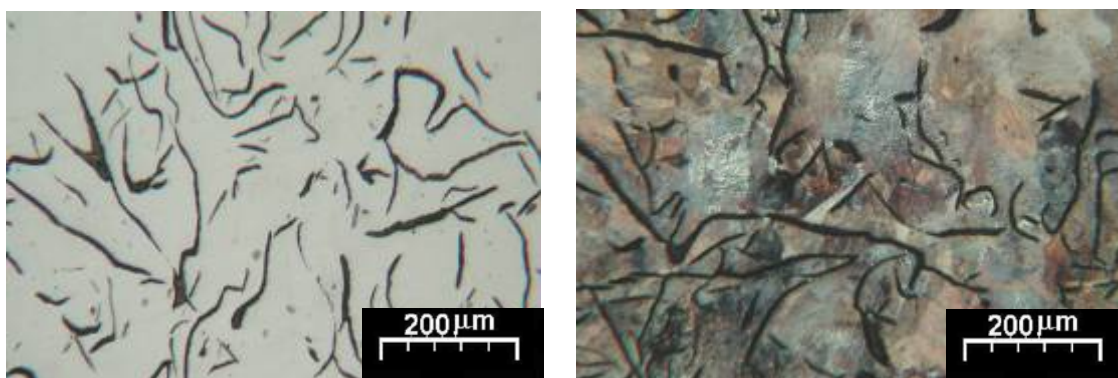
Figura 4.1: Micrografia a liga ENGJL250. (a) sem ataque químico.
(b) com ataque químico, Nital 2,5%.



(a)

(b)

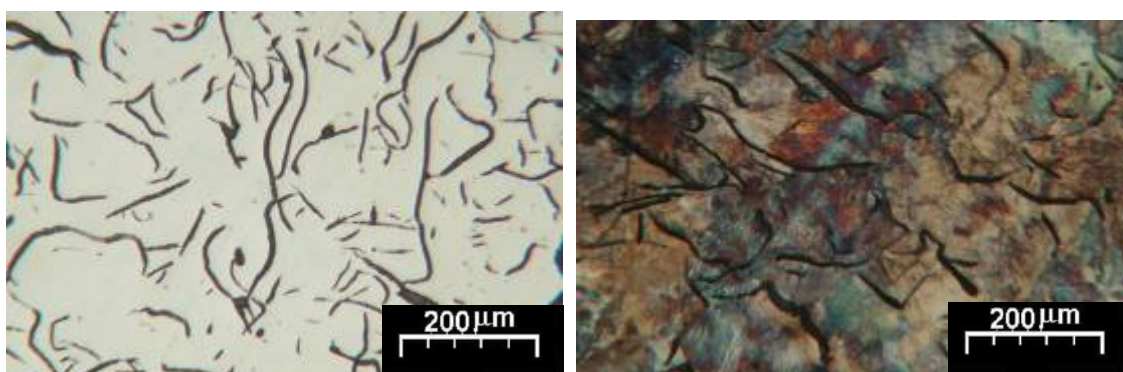
Figura 4.2: Micrografia da liga ENGJL300. (a) sem ataque químico. (b) com ataque químico, Nital 2,5%.



(a)

(b)

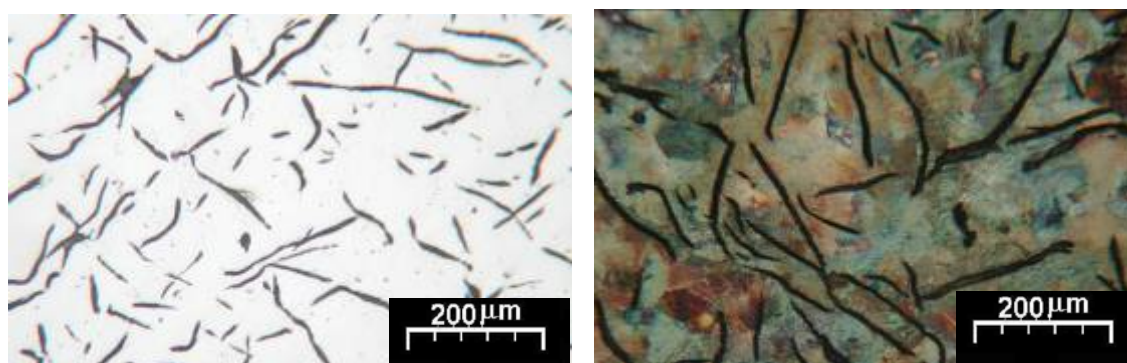
Figura 4.3: Micrografia a liga ENGJL350. (a) sem ataque químico. (b) com ataque químico, Nital 2,5%.



(a)

(b)

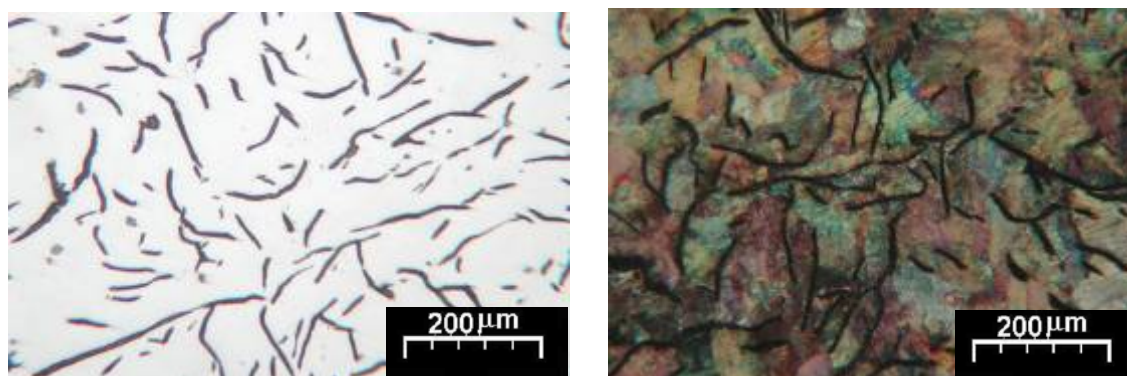
Figura 4.4: Micrografia a liga SA278CL35. (a) sem ataque químico. (b) com ataque químico, Nital 2,5%.



(a)

(b)

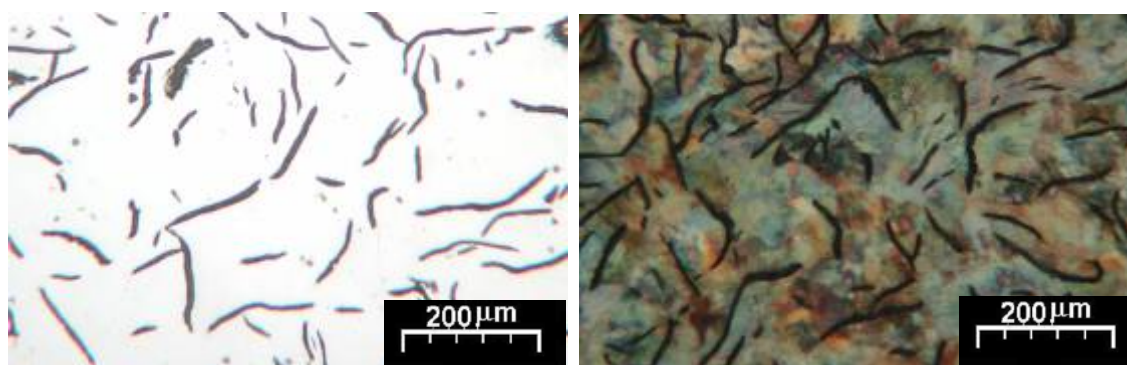
Figura 4.5: Micrografia a liga SA278CL40. (a) sem ataque químico.
(b) com ataque químico, Nital 2,5%.



(a)

(b)

Figura 4.6: Micrografia a liga SA278CL45. (a) sem ataque químico.
(b) com ataque químico, Nital 2,5%.



(a)

(b)

Figura 4.7: Micrografia a liga SA278CL50. (a) sem ataque químico.
(b) com ataque químico, Nital 2,5%.

Não foram encontradas fases decorrentes de super resfriamento (grafita tipos D e E) na superfície, pois os corpos de prova foram todos usinados a partir dos corpos de prova dos ensaios de tração, fora da região que sofreu esforço durante o ensaio. Foi observado, através das micrografias apresentadas sem ataque químico que a forma da grafita predominante foi forma I, distribuição da grafita tipo A em quantidade maior que 95%, com vestígios dos tipos B, C D e E em teores menor que 5% na somatória. O tamanho da grafita observado variou de 3-5, para todas as classes dos materiais estudados.

Nas micrografias apresentadas com ataque químico, observou-se uma matriz totalmente perlítica, para todas as classes dos materiais estudados.

As Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 mostram fases típicas que ocorrem para essas classes de materiais como: carbonetos, ferrita livre e steadita. E observou-se que essas fases não afetaram as propriedades mecânicas e térmicas dos materiais, por estarem em teores máximos de até 1%.

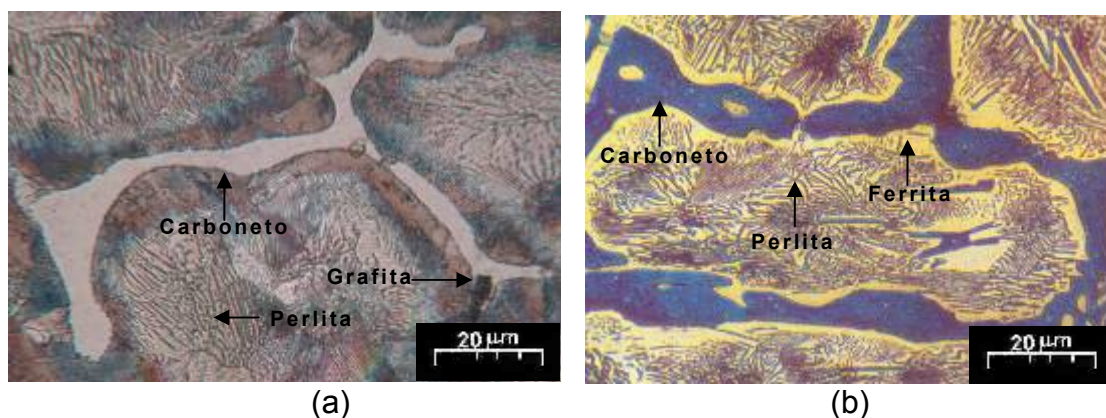


Figura 4.8: Micrografia típica de um ferro fundido cinzento das classes estudadas. (a) Presença de carbonetos. Ataque químico Nital 2,5%. (b) Presença de carbonetos. Ataque químico: Nital 2%, seguido com 2ml de ácido hidrocloreídrico a 35%, 0,5 ml de ácido selênico e 100ml de álcool a 95% [35].

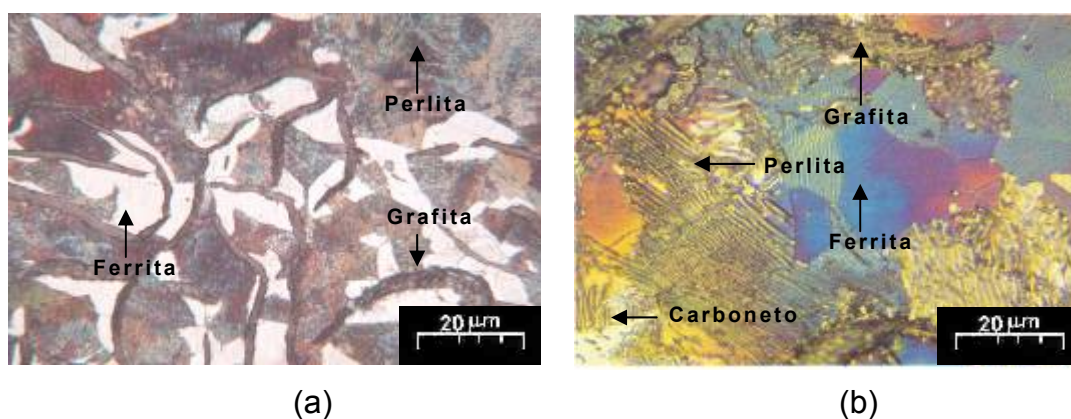


Figura 4.9: Micrografia típica de um ferro fundido cinzento das classes estudadas. (a) Presença de ferrita livre. Ataque químico Nital 2,5%, (b) Presença de ferrita livre. Ataque químico: picral 4%, seguido com 3g de metabisulfito de potássio e 10g de tiosulfato de sódio anídrico diluído em 100ml de água destilada [35].

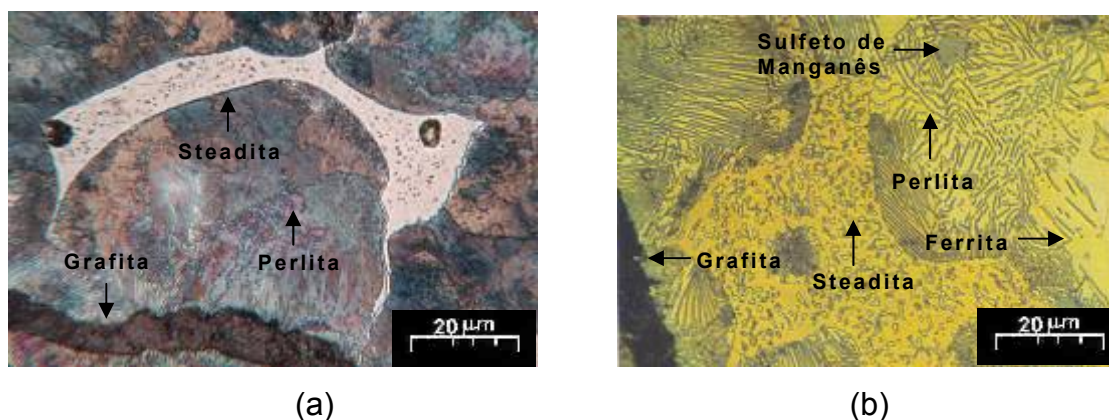


Figura 4.10: Micrografia típica de um ferro fundido cinzento das classes estudadas. (a) Presença de steadita. Ataque químico Nital 2,5%. (b) Presença de steadita. Ataque químico: Nital 2%, seguido com 1g de molibdato de sódio em 100ml de água destilada (pH 2,5-3) com o uso de ácido nítrico [35].

4.1.4 Condutividade Térmica

As condutividades térmicas medidas estão apresentadas na Tabela 4.6 e os resultados obtidos foram maiores que os valores

de literatura apresentados na Tabela 2.4, os quais variaram de 36-57Wm⁻¹K⁻¹, a temperatura de 100°C e com composições químicas variadas, sem levar em conta as propriedades mecânicas dessas ligas [24], enquanto que para os materiais estudados obtiveram-se valores na faixa de 50-59Wm⁻¹K⁻¹, para a mesma temperatura.

Tabela 4. 6: Condutividade térmica calculada.

Liga	Condutividade térmica (Wm ⁻¹ K ⁻¹)		
	100°C	150°C	200°C
ENGLJ250	52,77	48,92	48,15
	50,46	48,15	46,61
	50,45	45,84	43,53
ENGLJ300	55,08	53,53	51,59
	57,79	54,69	52,36
	52,75	47,32	45,38
ENGLJ350*	51,94	45,69	42,57
	48,04	45,30	41,01
	51,16	43,35	42,18
SA278CL35	55,08	52,39	48,15
	53,16	48,92	46,61
	47,38	46,61	45,84
SA278CL40	58,96	55,85	52,36
	59,73	55,47	50,81
	59,34	50,03	50,80
SA278CL45	49,60	48,43	48,43
	55,58	54,68	49,60
	54,29	50,38	49,21
SA278CL50*	57,41	52,33	47,26
	55,85	51,16	49,21
	52,33	50,38	49,21

*ligas de ferro fundido cinzento propostas

A condutividade térmica requerida em projeto, conforme Anexo A [36] é de $43\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (mínimo), independente da classe do material, assim pode-se observar que os resultados obtidos de $50\text{-}59\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ estão acima do requerido.

Baseados nos dados de Rukadikar [24], mostrado na Tabela 2.3, onde a 100°C a condutividade térmica da grafita é de 293 a $419\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, a ferrita é de 71 a $80\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, a perlita é $50\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ e a cementita é $7\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, pode-se concluir que o efeito da grafitização é o mais relevante para a condutividade térmica, pois a quantidade de grafita livre, característica dos ferros fundidos cinzentos é oito vezes a mais que na perlita. Portanto, quanto maior a quantidade da grafita, maior o seu tamanho e melhor sua forma (tipo A), maior será a condutividade térmica.

Esse efeito pode ser observado nas ligas de elevada resistência como SA278CL50, que apesar de apresentarem elementos de liga perlitizante, apresentam alta condutividade térmica, demonstrando que a grafitização é característica mais relevante para a condutividade térmica nos ferros fundidos cinzentos.

Foi observado que a condutividade térmica varia tendendo a uma relação linear com o aumento da temperatura, conforme mostrado na Figura 4.11, esses resultados também foram citados por Angus. [25]

Outros fatores que também contribuíram para a obtenção dos altos valores da condutividade térmica foram: parâmetros empregados no processo de fundição para peças de grande porte, moldagem usando materiais refratários, areia de sílica no macho, massa de moldagem de carbetto de silício no molde e o tempo de resfriamento de no máximo 30°C por hora dentro do molde, não provocando características microestruturais decorrentes de super resfriamento.

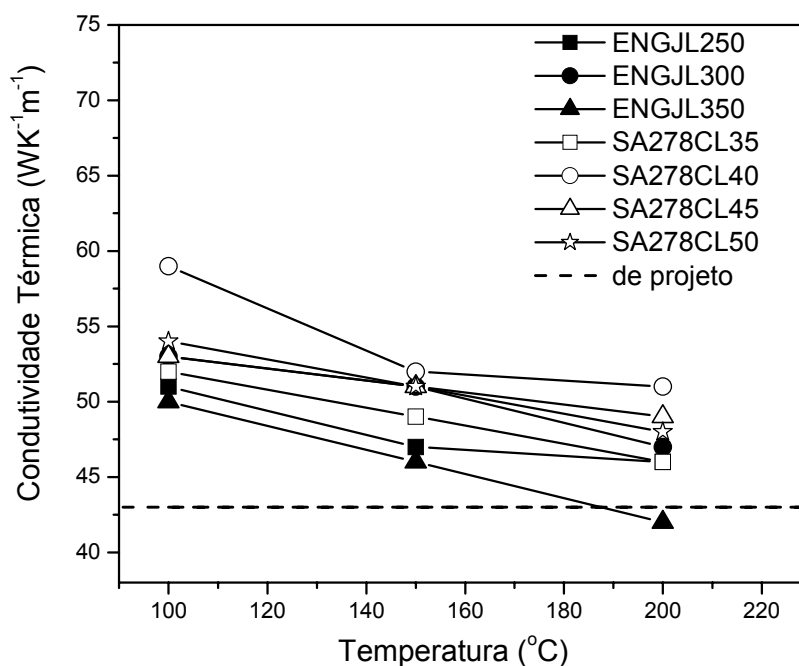


Figura 4.11: Resultados da condutividade térmica em função da temperatura.

Em consequência das condutividades térmicas obtidas para as ligas estudadas, pode-se garantir que será consumida uma quantidade menor de energia para uma mesma produção de papel, com o mesmo teor de umidade, gerando uma economia em todo o processo de produção de papel.

4.2 Espessuras da Camisa do Cilindro Secador

A partir das equações apresentadas no Anexo A, foram calculadas as espessuras de parede da camisa do cilindro secador para cada classe de liga, relacionando velocidade periférica da camisa com comprimento da camisa e pressão de teste da máquina em projeto. As Tabelas A.3 a A.9 demonstram a variação da espessura de parede em função desses parâmetros.

Os valores calculados demonstram que para as máquinas de

produção de papel com pressões de teste inferiores a 0,6MPa e comprimento da camisa menores que 6m e velocidades periférica permissível da camisa abaixo de 1200m/min, as classes de ligas ENGJL250, ENGJL300, SA278CL40 e SA278CL45, são adequadas, não havendo necessidade de empregar outras ligas de maior custo. As características acima descritas são apresentadas por aproximadamente 80% dos equipamentos existentes no Brasil.

No entanto, para máquinas de produção de papel maiores, ou seja, com características de produção superiores, a construção pode ser viabilizada empregando as ligas propostas, a ENGJL350 e a SA278CL50 e ainda com uma espessura de parede menor quando comparada com as demais ligas. Dessa forma, a camisa dos cilindros secadores tendo uma espessura menor, promoverá uma redução de peso dos cilindros secadores assim como das demais seções de secagem, redução do tamanho dos mancais e rolamentos e estruturas metálicas de suporte.

Foi realizado um exemplo prático dos cálculos da espessura de parede da camisa de um cilindro secador, segundo os critérios apresentados. E foi considerada uma situação em termos de comprimento do cilindro secador a ser produzido num futuro próximo. Os resultados finais calculados estão apresentados na Tabela 4.7.

Foi utilizada como referência uma máquina de produção de papel composta de 40 cilindros secadores e proposta a liga SA278CL45 como o material da camisa do cilindro, apresentando as seguintes características:

$$D_i = 1754\text{mm}$$

$$L = 12000\text{mm}$$

$$A = 13000\text{mm}$$

$$p = 1\text{MPa}$$

$$C_3 = C_5 = 2,5\text{mm e } C_4 = C_6 = 9,3\text{mm}$$

$$F = 4,5 \text{MPa}$$

$$d = 7200 \text{kg/m}^3$$

$$g = 9,8 \text{m/s}^2$$

$$v = 1800 \text{m/min}$$

$\sigma_1=31\text{MPa}$, $\sigma_2=31\text{MPa}$, $\sigma_3=11,25\text{MPa}$ para a liga SA278CL45 [3].

Critério A: dados empíricos de fabricação da Voith Paper, conforme eq. (A.1).

$$e_1 = 24 \leq 16 + \frac{L}{800} \quad (\text{A.1})$$

$$e_1 = 31,0 \text{mm}$$

Critério B: baseado na ASTM [3] segundo as eqs. (A.2) a (A.4).

$$H_1 = \frac{\sigma_1 + p}{\sigma_1 - p} \quad (\text{A.2})$$

$$e_2 = C_3 + \frac{1}{2} D_i [\sqrt{H_1} - 1] \quad (\text{A.3})$$

$$e_2 = 31,2 \text{mm}$$

$$e_3 = C_4 + \frac{2}{5} D_i [\sqrt{H_1} - 1] \quad (\text{A.4})$$

$$e_3 = 33,2 \text{mm}$$

Critério C: definição interna Voith segundo as eqs. (A.5) a (A.8).

$$q = d v^2 \quad (\text{A.5})$$

$$H_2 = \frac{3(\sigma_2 + p - q) + q + \sqrt{3^2(\sigma_2 + p - q)^2 + 12pq}}{6(\sigma_2 - p - q) + q} \quad (\text{A.6})$$

$$e_4 = C_5 + \frac{1}{2} D_i (\sqrt{H_2} - 1) \quad (\text{A.7})$$

$$e_4 = 38,9 \text{mm}$$

$$e_5 = C_6 + \frac{2}{5} D_i (\sqrt{H_2} - 1) \quad (\text{A.8})$$

$$e_5 = 38,4\text{mm}$$

Critério D: em função da tensão de tela conforme eq. (A.9).

$$e_6 = 2\text{mm} + \frac{3F}{16\sigma_3} + \sqrt{\left(\frac{3F}{16\sigma_3}\right)^2 + \frac{3FDi}{8\sigma_3}} \quad (\text{A.9})$$

$$e_6 = 19,3\text{mm}$$

Critério E: baseado na deflexão da viga, segundo a eq. (A.10).

$$e_7 = 2\text{mm} + \frac{\frac{Di}{58} + 10^9 \left(\frac{2F}{gd\pi(Di + e_7)} \right)}{10^9 \times \left(\frac{2Di}{gdA^2} \right) \times \left[\sigma_3 - \left(\frac{3gd(A-L)}{10^9} \right) \right]^{-1}} \quad (\text{A.10})$$

$$e_7 = 30,2\text{mm}$$

Tabela 4.7: Espessura de parede da camisa do cilindro secador calculado para a liga SA278CL45.

Critério	Espessura de parede (mm)
e ₁	31,0
e ₂	31,2
e ₃	33,2
e ₄	38,9
e ₅	38,4
e ₆	19,3
e ₇	30,2

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4.7 a espessura final da camisa do cilindro secador adotada para uso de fabricação será de 39mm.

Para efeito de comparação foram utilizadas as ligas

SA278CL40, SA278CL45 e SA278CL50 e calculadas as espessuras de parede (segundo os mesmos critérios), o peso e o custo de fabricação para de um cilindro secador fundido bruto e a Tabela 4.8 apresenta os valores obtidos.

Os valores apresentados na Tabela 4.8 mostram que cilindros secadores produzidos com a liga SA278CL50, que é uma das ligas proposta neste trabalho apresentaram a menor espessura de parede e conseqüentemente o menor peso por cilindro secador e o menor custo.

Tabela 4.8: Espessura de parede, peso e custo de fabricação para o cilindro secador fundido bruto com as ligas SA278CL40, SA278CL45 e SA278CL50.

Liga	Espessura de parede (mm)	Peso unitário (kg)	Custo de fabricação* (US\$)
SA278CL40	45	26860	56406.00
SA278CL45	39	23950	50715.00
SA278CL50	35	22020	46962.00

*Considerando US\$ 2.10 o quilo do ferro fundido usado na produção do cilindro [37].

Para uma máquina de produção de papel com 40 cilindros secadores, comparando os custos na fundição dos mesmos, sem contar os custos de usinagem, montagem e outros, observa-se que gera uma redução de US\$ 377760.00 quando comparado com a liga SA278CL40, e de US\$ 150120.00 quando comparado com a liga SA278CL45, que é a liga de maior resistência mecânica usada atualmente na produção de cilindros secadores.

Para efeito comparativo, também foi usado um software BATRO2 [38] de propriedade a Voith Paper, e foi simulado a performance de uma máquina de produção de papel com 40 cilindros secadores, com as propriedades obtidas nos ensaios

realizados para as ligas em acordo com ASTM [3], e foi verificado um aumento na velocidade da máquina de produção de papel.

A Tabela 4.9 mostra os resultados obtidos da velocidade periférica do cilindro secador a partir da simulação para as ligas SA278CL40, SA278CL45 e SA278CL50, considerando condições de produção de papel para embalagem.

Tabela 4.9 Resultados obtidos por simulação, empregando as condições utilizadas na produção de papel para embalagem.

LIGA	SA 278 CL 40	SA 278 CL 45	SA 278 CL 50
Gramatura (g/m ²)	75	75	75
Comprimento da camisa(m)	12	12	12
Pressão média de teste (MPa)	0,85	0,85	0,85
Teor de umidade na entrada (%)	49	49	49
Teor de umidade na saída (%)	5	5	5
Espessura de parede da camisa (mm)	45	39	35
Condutividade térmica (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	59,34	53,16	55,2
Velocidade periférica (m/min)*	1800	1810	1845
Percentual de ganho (%)		0,56	2,50

*Resultado fornecido com a simulação

A Tabela 4.9 demonstra que apesar da diminuição da condutividade térmica (valores obtidos experimentalmente) para as ligas de maior resistência, ocorreu uma diminuição da espessura da parede da camisa (calculada segundo os critérios descritos no Anexo A), dessa forma o resultado da simulação mostrou um aumento da velocidade periférica do cilindro secador. Assim, a somatória desses valores, resultou em um ganho de produção promovido pelo aumento da velocidade periférica do cilindro secador e um ganho decorrente da possibilidade de usar um cilindro secador de menor peso com as ligas de maior resistência.

A Figura 4.12 mostra a relação da pressão de teste em função da velocidade periférica para as ligas SA278CL40 e SA278CL45 usualmente empregadas e a liga SA278CL50 (uma das ligas propostas neste trabalho) para uma espessura de parede de 35mm e mantendo as características de comprimento da camisa, tensão de tela e diâmetro da máquina de produção de papel usada nos cálculos anteriores.

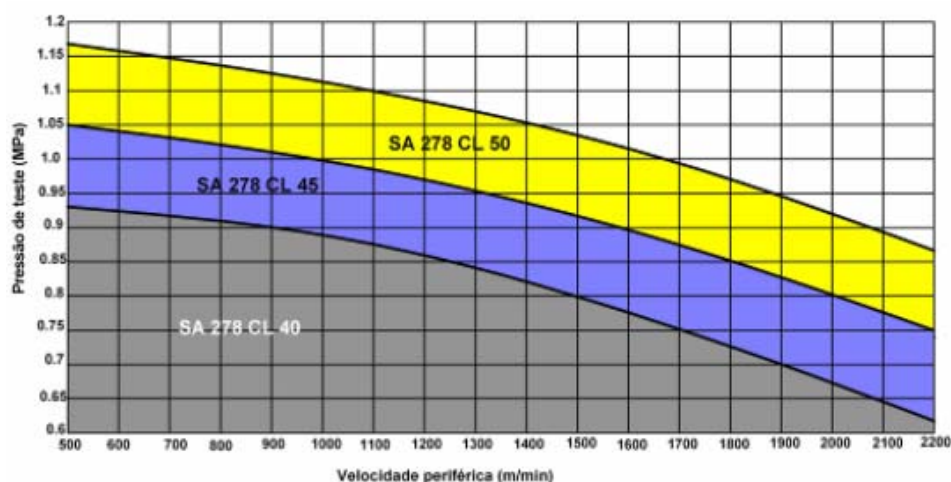


Figura 4.12: Variação da pressão de teste em função da variação da velocidade periférica dos cilindros secadores para as ligas SA278CL40, SA278CL45 e SA278CL50.

Normalmente não se usa uma liga de maior resistência sem alguma economia, pois essas ligas são de maior custo de fabricação, pela adição dos elementos de liga, maior custo de usinagem, maior risco no processo de fundição e outros.

Através dos resultados apresentados nas Tabelas A.3 a A.9, foi possível observar que em determinadas condições de projeto, a uma mesma velocidade periférica, pressão de teste e comprimento do cilindro secador, o uso de uma liga de maior resistência pode levar a uma espessura de parede menor, resultando numa redução no peso dos cilindros secadores.

5. Conclusões

Diante dos resultados obtidos e das análises e discussões apresentadas concluiu-se que:

As condições utilizadas na fabricação dos cilindros secadores como: sistema de moldagem, composição química e velocidade de resfriamento, foram adequadas para a obtenção das microestruturas desejadas, assim como das propriedades mecânicas (resistência à tração e dureza) e física (condutividade térmica), especificadas por normas de fabricação.

A não adição de molibdênio na liga SA278CL50 não afetou a resistência à tração e dureza, gerando uma economia na produção do cilindro secador em torno de 7% em relação ao mesmo cilindro secador com a adição de molibdênio.

As duas ligas propostas, SA278CL50 e ENGJL350 se mostraram viáveis sob o aspecto de resistência mecânica, condutividade térmica e de construção mecânica do equipamento e se tornando uma solução para o uso em máquinas de produção de papel, de alta velocidade e com grandes comprimentos de cilindros secadores.

As ligas propostas gerarão uma redução de custo na produção de papel. Os valores de condutividade térmica obtidos, em conjunto com as espessuras das paredes calculadas dos cilindros secadores, a partir de ligas de maior resistência mecânica, gerarão um aumento na produção de papel em até 2,5%.

6. Sugestões para Trabalhos Futuros

Redimensionar uma seção de secagem da máquina de papel com o uso de materiais de alta condutividade térmica, diminuindo o número de cilindros secadores.

Estudar a possibilidade de uso do ferro fundido de grafita compacta para a aplicação em cilindros secadores da máquina de produção de papel.

Verificar a possibilidade de fundir os cilindros secadores de máquina de produção de papel por centrifugação.

7. Referências Bibliográficas

[1] Falsarella, P. *Curso em Tecnologia de Celulose e Papel*. São Paulo, Ed. da Universidade Federal de Viçosa, 2005.

[2] EN-EUROPEAN STANDARD. European Committee for Standardization, DIN EN 1561, Giessereiwesen-Gusseisen mit Lamellengraphit, German version, 1997.

[3] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Specification for Gray Cast Iron Casting, Designation A48/A48M-03. In: Annual Book of ASTM Standards, Iron and Steel Products, Ferrous Castings, Ferroalloys, West Conshohocken, PA, v. 01.02, 2005.

[4] EN-EUROPEAN STANDARD. European Committee for Standardization, DIN EN 10002-1, Metallic Materials, Tensile Testing, Part 1 Method of Test at Ambient Temperature, German version, 1991.

[5] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Termal Diffusivity of Solids by the Flash Method, Designation E1461/E1461M-92. In: Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA, 2005.

[6] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Methods of Preparacion of Metallographic Specimens, Designation E3-95 (reapproved 1995). In: Annual Book of ASTM Standards, Metals Mechanical Testing, Elevated and Low Temperature Tests, Metallography. Philadelphia,v.03.01, 1995.

[7] Philipp, P.; D'Almeida, M.L. *Tecnologia de Fabricação do Papel*. São Paulo, Ed. Escola Senai "Theobaldo de Nigris", 1988.

[8] Macdonald, R.G. et al. *Paper Making and Paperboard Making*, Ed. McGraw-Hill, New York, 1970.

[9] Suikki, H. Melhorias com Ar na Produção de Papel. In: 35º CONGRESSO E EXPOSIÇÃO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL. 14 a 17 de outubro, 2002, São Paulo, Anais...São Paulo, 2002.

[10] Romano, G. L., Sistema de Vapor e Condensado. In: SEMINÁRIO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL, setembro, 2000, Luiz Antonio-SP, Anais... Luiz Antonio-SP, 2000.

[11] Ribeiro, C.A.S. *Anotações da Disciplina de Fundição*, Ed. Universidade do Porto, Porto, 2000.

[12] Chiaverini, V. *Aços e Ferros Fundidos*. São Paulo, Ed. ABM, 2002.

[13] AMERICAN SOCIETY FOR METALS METALS INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS. *Metals Handbook: Casting*. 9 ed. Metals Park, 1988, Ohio, v.15.

[14] Pieske, A., et al. *Ferros Fundidos Cinzentos de Alta Qualidade*. Joinville, Ed. Sociedade Educacional Tupy, 1976.

[15] Seabra, A.V. *Metalurgia Geral*. Porto, Ed. Universidade do Porto, 1994.

- [16] BRITISH CAST IRON RESEARCH ASSOCIATION. Membership Services, *Production of Grey Iron*, BCIRA Group Company, Birmingham, 1984.
- [17] EN-EUROPEAN STANDARD. European Committee for Standardization, DIN EN ISO 945, Gusseisen, Bestimmung der Mikrostruktur von Graphit, German version, 1994.
- [18] Branco, C.H.C. *Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares*, São Paulo, Ed. IPT, 1977.
- [19] Krause, D.E. *Gray Iron-A Unique Engineering Material*, Gray Iron Info, Philadelphia, 1990.
- [20] Siegel, M. *Curso de Fundição*, São Paulo, Ed. ABM, 1978.
- [21] Souza, S.A. *Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos*. São Paulo, Ed. Edgard Blucher Ltda, 1982.
- [22] Dawson, S. et al. The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron. In: DESIGN AND MACHINING WORKSHOP, June, 1999, Ohio. Anais... Ohio, 1999.
- [23] Mocellin F. et.al. Study of the Machinability of Compacted Graphite Iron for Drilling Process. In: II BRAZILIAN MANUFACTURING CONGRESS, 18 at 21 May, 2003, Uberlandia, MG. Anais... Uberlandia, MG, 2003.
- [24] Rukadikar, M.C.; Reddy, G.P. Influence of Chemical Composition and Microstructure on Thermal Conductivity of Alloyed Perlitic Graphite Cast Iron. *Journal of Materials Science*, v. 21, p. 4403-4410, 1986.

[25] Angus, H.I. *Cast Iron Physical and Engineering Property*, London, Ed. Butter Worth, 1976.

[26] Campos, M.P.; Davies, G.J. *Solidificação e Fundição de Metais e Suas Ligas*, São Paulo, Ed. LTC, 1978.

[27] Ferreira, J.M.G.C. *Tecnologia da Fundição*, Lisboa, Ed. Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.

[28] Brown, J.R. *Ferrous Foundryman's*, London, Ed. Foseco, 2000.

[29] Callister, W.D.Jr. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. Rio de Janeiro, Ed. LTC, 2002.

[30] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *Boiler and Pressure Vessel Code, Rules for Construction of Pressure Vessels*, In: ASME. Boiler & Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1, New York, 2003.

[31] AD-MERKBLATT CODE. *Technical Rules for Pressure Vessels, Series W Materials*, In: AD2000-MERKBLATT W/1. Cast Iron with Lamellar Graphite, 2000 edition, Luxemburger, 2004.

[32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Comitê Brasileiro de Máquinas e Equipamentos Mecânicos, CB-04, NBR NM 187-2:1999, Materiais Metálicos, Parte 2: Calibração de Máquinas de Medir Dureza Brinell, Rio de Janeiro, 1999.

[33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT-NBR ISO NM 7500-1:2004, Materiais Metálicos, Calibração de Máquinas de Ensaio Estático Uniaxial, Parte 1: Máquinas de

Ensaio de Tração/Compressão, Rio de Janeiro, 2004.

[34] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Comitê Brasileiro de Máquinas e Equipamentos Mecânicos, CB-04, NBR NM 187-2:1999, Materiais Metálicos, Parte 1: Medição de Dureza Brinell, Rio de Janeiro, 1999.

[35] Beraha, E., Shpigler B., *Color Metallography*, p. 39-42, Ed. American Society for Metals, Ohio, 1977.

[36] DIRETRIZES DE PROJETO PARA CILINDRO SECADOR PADRÃO: Kori nº. 1039, Brasil, 1998.

[37] Associação Brasileira das Indústrias de Fundição, São Paulo, 31 jan. 2006. Disponível em: <http://www.abifa.com.br>. Acesso em 31 jan. 2006.

[38] Voith Paper Holding GmbH & CO.KG, Softwer Batro 2, version 2, 21 aug.1997.

Anexo A

A.1 Diretrizes de Projeto para Cilindros Secadores do Grupo Voith Paper

A espessura da camisa do cilindro secador foi calculada a partir das eqs (A.1) a (A.11), obtidas das diretrizes internas do grupo Voith Paper [36].

1- *Definição*: roteiro criado para determinação da espessura da camisa do cilindro secador para uma máquina de produção de papel.

2- *Cargas básicas das camisas*: Semi-estáticas e Dinâmica

As cargas semi-estáticas são as pressões sobre a superfície interna (pressão do vapor de aquecimento). As cargas dinâmicas são consideradas como o próprio peso da camisa, a tração da tela, a força devida à massa do condensado e a tração da folha de papel exercida quando os cilindros secadores estão em operação.

3- *Restrições Impostas*:

- A condutividade térmica deve ser maior que a mínima usada para projeto.
- O meio de aquecimento deve ser o vapor de água e a sobre pressão (p) permissível do vapor de aquecimento. O critério para a determinação da espessura da parede (e), segundo definição interna da empresa, deve-se considerar:

$$0,25\text{MPa} \leq p \leq 1,20\text{MPa}$$

- O material da camisa do cilindro secador deve ser o ferro fundido cinzento, conforme especificado na Tabela A.1.

Tabela A.1: Especificação do material da camisa do cilindro secador.

Classe das ligas	ENGJL			SA278CL			
	250	300	350*	35	40	45	50*
sobre pressão (p)	≤0,6	≤1,2	≤1,2	≤1,1	≤1,1	≤1,1	≤1,1

*Ligas de ferro fundido cinzento propostas.

- Velocidade periférica de construção $v \leq 2500\text{m/min}$.
- Tração da tela: $F \leq 5\text{ kN/m}$.
- Distâncias entre centros dos rolamentos: $A \leq 13\text{m}$.
- Condutividade térmica: $CT \geq 43\text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$ (100°C).

4- *Tensões permissíveis*: A Tabela A.2 mostra as tensões permissíveis usadas para determinar a espessura da camisa do cilindro secador (e). Os valores de σ_1, σ_2 e σ_3 são usados com fator de segurança de dez para os cálculos da espessura da camisa de cilindro secador se utilizado a norma ASME [30] e fator sete se utilizado a norma EN [31].

Tabela A.2: Tensões permissíveis para o dimensionamento da espessura da camisa sem falhas.

Classe das ligas	σ_1	σ_2	σ_3
	Regulamentos oficiais (MPa)	Definição interna (MPa)	Definição interna (MPa)
	Estática	Semi-estática	Dinâmica
ENGJL250*	25,00	$81\sqrt[5]{1\text{mm}/e(\text{bruto})}$	9,00
ENGJL300*	30,00	$100\sqrt[5]{1\text{mm}/e(\text{bruto})}$	10,00
ENGJL350*	35,00	$118\sqrt[5]{1\text{mm}/e(\text{bruto})}$	11,00
SA278CL35	24,10	24,10	9
SA278CL40	27,60	27,60	10,00
SA278CL45	31,00	31,00	11,25
SA278CL50	34,50	34,50	12,50
Ferro cinzento**	10,00	14,00	4,00

*Recozido; **sem certificado de inspeção.

30mm < e (bruto) < 80mm; Na Fundição Voith: $e(\text{bruto}) = e_i + (20-30)\text{mm}$

A. 2 Cálculo de Espessura da Camisa do Cilindro Secador

Um dos objetivos deste trabalho foi propor ligas de ferro fundido cinzento não convencionais na produção de cilindros secadores de grande porte e que apresentassem boas relações de peso, pressão, tamanho e velocidade. E para isso necessário calcular a espessura mínima de parede da camisa dos cilindros secadores

As equações empregadas são baseadas em dados empíricos e nos cálculos de vasos de pressão, segundo as normas ASME [30] e EN [31], reavaliadas e utilizadas como diretrizes de projeto para cilindros secadores na empresa VOITH PAPER.

Os cálculos utilizados na determinação da espessura da camisa do cilindro secador obedeceram aos critérios descritos abaixo:

Critério A: baseado em dados empíricos de fabricação da Voith Paper, conforme eq. (A.1).

$$e_1 = 24 \leq 16 + \frac{L}{800} \quad (\text{A.1})$$

onde:

L = comprimento da camisa do cilindro secador, mm;

e_1 = espessura de parede da camisa do cilindro secador, mm.

Critério B: baseado na EN [2] e ASTM [3] segundo as eqs. (A.2) a; (A.4).

$$H_1 = \frac{\sigma_1 + p}{\sigma_1 - p} \quad (\text{A.2})$$

$$e_2 = C_3 + \frac{1}{2} Di [\sqrt{H_1} - 1] \quad (\text{A.3})$$

$$e_3 = C_4 + \frac{2}{5} Di [\sqrt{H_1} - 1] \quad (\text{A.4})$$

onde:

D_i = diâmetro interno da camisa do cilindro secador, mm;

e_2 e e_3 = espessura de parede da camisa do cilindro secador, mm;

σ_1 = tensão normalizada da liga utilizada, MPa;

p = pressão de teste do cilindro secador, MPa

$C_3 = C_5 = 2,5$ mm e $C_4 = C_6 = 9,3$ mm (são constantes de sobre espessuras).

Critério C: segundo definição interna Voith, leva em conta a sobre pressão do vapor de aquecimento e a velocidade periférica do cilindro secador, estando fora da área de influência da extremidade do cilindro secador, segundo as eqs. (A.5) a (A.8).

$$q = d v^2 \quad (A.5)$$

onde:

d = densidade da liga da camisa. (7200kg/m^3)

v = velocidade periférica permissível da camisa, (m/min).

$$H_2 = \frac{3(\sigma_2 + p - q) + q + \sqrt{3^2(\sigma_2 + p - q)^2 + 12pq}}{6(\sigma_2 - p - q) + q} \quad (A.6)$$

$$e_4 = C_5 + \frac{1}{2} D_i (\sqrt{H_2} - 1) \quad (A.7)$$

$$e_5 = C_6 + \frac{2}{5} D_i (\sqrt{H_2} - 1) \quad (A.8)$$

onde:

σ_2 = tensão interna semi-estática da liga do cilindro, MPa;

D_i = diâmetro interno do cilindro secador, mm;

p = pressão de teste do cilindro secador, MPa;

e_4 e e_5 = espessura de parede da camisa do cilindro secador, mm.

Critério D: em função da tensão de tela conforme eq. (A.9).

$$e_6 = 2\text{mm} + \frac{3F}{16\sigma_3} + \sqrt{\left(\frac{3F}{16\sigma_3}\right)^2 + \frac{3FDi}{8\sigma_3}} \quad (\text{A.9})$$

onde:

F= tensão de tela na máquina de produção de papel ($F \leq 5\text{kN/m}$);

σ_3 = tensão interna dinâmica da liga do cilindro, MPa;

Di = diâmetro interno do cilindro secador, mm.

Critério E: leva em conta a deflexão da viga, segundo a eq. (A.10).

$$e_7 = 2\text{mm} + \frac{\frac{Di}{58} + 10^9 \left(\frac{2F}{gd\pi(Di + e_7)} \right)}{10^9 \times \left(\frac{2Di}{gdA^2} \right) \times \left[\sigma_3 - \left(\frac{3gd(A-L)}{10^9} \right) \right] - 1} \quad (\text{A.10})$$

$$A = L + 1000\text{mm} \quad (\text{A.11})$$

onde:

A= distância entre centro dos mancais do cilindro secador, mm;

L = comprimento da camisa do cilindro secador, mm;

F= tensão de tela da máquina de produção de papel ($F \leq 5\text{kN/m}$);

Di = diâmetro interno do cilindro secador, mm;

g = aceleração da gravidade, ($9,8\text{m/s}^2$);

d= densidade da liga da camisa do cilindro secador (7200kg/m^3).

O cálculo da espessura de parede da camisa do cilindro secador foi baseado no diâmetro interno nominal, Di, a temperatura ambiente e com tolerância de fabricação de $-4\text{mm} + 0\text{mm}$.

Sempre será adotado como espessura de parede da camisa do cilindro (e), o maior valor obtido, segundo os critérios de e_1 até e_7 . A espessura mínima deve ser tolerada com afastamento de $+2\text{mm}$ e as tolerâncias de forma e posição devem ser observadas separadamente.

Tabela A.3: Espessura de parede calculada para liga ENGJL350.

Comprimento (mm)	Pressão de teste (MPa)								
	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0
3000	24	24	25	27	28	29	30	32	32
4000	24	24	25	27	28	29	30	32	32
5000	24	24	25	27	28	29	30	32	32
6000	24	24	25	27	28	29	30	32	32
7000	24	24	25	27	28	29	30	32	32
8000	25	25	25	27	28	29	30	32	32
9000	26	26	26	27	28	29	30	32	32
10000	27	27	27	28	28	29	30	32	32
11000	28	28	28	29	29	29	30	32	32
12000	30	30	30	30	30	30	30	32	32

Tabela A.4: Espessura de parede calculada para liga ENGJL300.

Comprimento (mm)	Pressão de teste (MPa)								
	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0
3000	24	25	26	28	29	30	31	32	34
4000	24	25	26	28	29	30	31	32	34
5000	24	25	26	28	29	30	31	32	34
6000	24	25	26	28	29	30	31	32	34
7000	25	25	26	28	29	30	31	32	34
8000	26	26	26	28	29	30	31	32	34
9000	28	28	28	28	29	30	31	32	34
10000	29	29	29	29	29	30	31	32	34
11000	30	30	30	30	30	30	31	32	34
12000	31	31	31	31	31	31	31	32	34

Tabela A.5: Espessura de parede calculada para liga ENGJL250.

Comprimento (mm)	Pressão de teste (MPa)					
	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55
3000	24	24	24	24	24	25
4000	24	24	24	24	24	25
5000	24	24	24	24	24	25
6000	24	24	24	24	25	26
7000	25	25	25	25	25	26
8000	26	26	26	26	26	26
9000	28	28	28	28	28	28
10000	29	29	29	29	29	29
11000	30	30	30	30	30	30
12000	31	31	31	31	31	31

Tabela A.6: Espessura de parede calculada para liga SA278CL35.

V(m/min)	P		0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,00
	L								
800	3000		26	26	28	31	33	36	39
	4000		26	26	28	31	33	36	39
	5000		26	26	28	31	33	36	39
	6000		26	26	28	31	33	36	39
	7000		27	27	28	31	33	36	39
	8000		28	28	28	31	33	36	39
	9000		30	30	30	31	33	36	39
	10000		31	31	31	31	33	36	39
	11000		32	32	32	32	33	36	39
	12000		33	33	33	33	33	36	39
1000	3000		26	26	28	31	35	38	40
	4000		26	26	28	31	35	38	40
	5000		26	26	28	31	35	38	40
	6000		26	26	28	31	35	38	40
	7000		27	27	28	31	35	38	40
	8000		28	28	28	31	35	38	40
	9000		30	30	30	31	35	38	40
	10000		31	31	31	31	35	38	40
	11000		32	32	32	32	35	38	40
	12000		33	33	33	33	35	38	40
1200	3000		26	26	28	32	35	40	41
	4000		26	26	28	32	35	40	41
	5000		26	26	28	32	35	40	41
	6000		26	26	28	32	35	40	41
	7000		27	27	28	32	35	40	41
	8000		28	28	28	32	35	40	41
	9000		30	30	30	32	35	40	41
	10000		31	31	31	32	35	40	41
	11000		32	32	32	32	35	40	41
	12000		33	33	33	33	35	40	41
1400	3000		26	28	30	33	37	40	43
	4000		26	28	30	33	37	40	43
	5000		26	28	30	33	37	40	43
	6000		26	28	30	33	37	40	43
	7000		27	28	30	33	37	40	43
	8000		28	29	31	33	37	40	43
	9000		30	30	31	33	37	40	43
	10000		31	32	32	33	37	40	43
	11000		33	33	33	33	37	40	43
	12000		33	33	33	33	37	40	43
1800	3000		26	28	33	35	40	43	48
	4000		26	28	33	35	40	43	48
	5000		26	28	33	35	40	43	48
	6000		26	28	33	35	40	43	48
	7000		26	28	33	35	40	43	48
	8000		29	30	33	35	40	43	48
	9000		30	31	33	35	40	43	48
	10000		31	32	33	35	40	43	48
	11000		33	33	35	37	40	43	48
	12000		33	33	35	37	40	43	48
2200	3000		28	32	37	42	45	52	56
	4000		28	32	37	42	45	52	56
	5000		28	32	37	42	45	52	56
	6000		28	32	37	42	45	52	56
	7000		28	32	37	42	45	52	56
	8000		30	32	37	42	45	52	56
	9000		30	32	37	42	45	52	56
	10000		31	34	37	42	45	52	56
	11000		33	34	37	42	45	52	56
	12000		33	34	37	42	45	52	56

p= pressão de teste em (MPa); L= comprimento em (mm); V= velocidade em (m/min)

Tabela A.7: Espessura de parede calculada para liga SA278CL40.

V(m/min)	P		0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,00
	L								
800	3000		24	24	26	29	31	34	37
	4000		24	24	26	29	31	34	37
	5000		24	24	26	29	31	34	37
	6000		24	24	26	29	31	34	37
	7000		25	25	26	29	31	34	37
	8000		26	26	26	29	31	34	37
	9000		28	28	28	29	31	34	37
	10000		29	29	29	29	31	34	37
	11000		30	30	30	30	31	34	37
	12000		31	31	31	31	31	34	37
1000	3000		24	24	26	29	32	35	38
	4000		24	24	26	29	32	35	38
	5000		24	24	26	29	32	35	38
	6000		24	24	26	29	32	35	38
	7000		25	25	26	29	32	35	38
	8000		26	26	26	29	32	35	38
	9000		28	28	28	29	32	35	38
	10000		29	29	29	29	32	35	38
	11000		30	30	30	30	32	35	38
	12000		31	31	31	31	32	35	38
1200	3000		24	24	27	30	33	36	39
	4000		24	24	27	30	33	36	39
	5000		24	24	27	30	33	36	39
	6000		24	24	27	30	33	36	39
	7000		25	25	27	30	33	36	39
	8000		26	26	27	30	33	36	39
	9000		28	28	28	30	33	36	39
	10000		29	29	29	30	33	36	39
	11000		30	30	30	30	33	36	39
	12000		31	31	31	31	33	36	39
1400	3000		24	25	28	31	34	37	41
	4000		24	25	28	31	34	37	41
	5000		24	25	28	31	34	37	41
	6000		24	25	28	31	34	37	41
	7000		25	25	28	31	34	37	41
	8000		26	26	28	31	34	37	41
	9000		28	28	28	31	34	37	41
	10000		29	29	29	31	34	37	41
	11000		30	30	30	31	34	37	41
	12000		31	31	31	31	34	37	41
1800	3000		24	27	30	33	37	41	45
	4000		24	27	30	33	37	41	45
	5000		24	27	30	33	37	41	45
	6000		24	27	30	33	37	41	45
	7000		25	27	30	33	37	41	45
	8000		26	27	30	33	37	41	45
	9000		28	28	30	33	37	41	45
	10000		29	29	30	33	37	41	45
	11000		30	30	30	33	37	41	45
	12000		31	31	31	33	37	41	45
2200	3000		26	30	34	38	43	48	53
	4000		26	30	34	38	43	48	53
	5000		26	30	34	38	43	48	53
	6000		26	30	34	38	43	48	53
	7000		26	30	34	38	43	48	53
	8000		26	30	34	38	43	48	53
	9000		28	30	34	38	43	48	53
	10000		29	30	34	38	43	48	53
	11000		30	30	34	38	43	48	53
	12000		31	31	34	38	43	48	53

p= pressão de teste em (MPa); L= comprimento em (mm); V= velocidade em (m/min)

Tabela A.8: Espessura de parede calculada para liga SA278CL45.

V(m/min)	P		0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,00
	L								
800	3000		24	24	24	27	29	31	34
	4000		24	24	24	27	29	31	34
	5000		24	24	24	27	29	31	34
	6000		24	24	24	27	29	31	34
	7000		25	25	24	27	29	31	34
	8000		26	26	24	27	29	31	34
	9000		28	28	24	28	29	31	34
	10000		29	29	24	29	29	31	34
	11000		30	30	24	30	30	31	34
	12000		31	31	31	31	31	31	34
1000	3000		24	24	24	27	29	32	34
	4000		24	24	24	27	29	32	34
	5000		24	24	24	27	29	32	34
	6000		24	24	24	27	29	32	34
	7000		25	25	25	27	29	32	34
	8000		26	26	26	27	29	32	34
	9000		28	28	28	28	29	32	34
	10000		29	29	29	29	29	32	34
	11000		30	30	30	30	30	32	34
	12000		31	31	31	31	31	32	34
1200	3000		24	24	25	27	30	33	35
	4000		24	24	25	27	30	33	35
	5000		24	24	25	27	30	33	35
	6000		24	24	25	27	30	33	35
	7000		25	25	25	27	30	33	35
	8000		26	26	26	27	30	33	35
	9000		28	28	28	28	30	33	35
	10000		29	29	29	29	30	33	35
	11000		30	30	30	30	30	33	35
	12000		31	31	31	31	31	33	35
1400	3000		24	24	25	28	31	33	36
	4000		24	24	25	28	31	33	36
	5000		24	24	25	28	31	33	36
	6000		24	24	25	28	31	33	36
	7000		25	25	25	28	31	33	36
	8000		26	26	26	28	31	33	36
	9000		28	28	28	28	31	33	36
	10000		29	29	29	29	31	33	36
	11000		30	30	30	30	31	33	36
	12000		31	31	31	31	31	33	36
1800	3000		24	24	27	30	33	36	39
	4000		24	24	27	30	33	36	39
	5000		24	24	27	30	33	36	39
	6000		24	24	27	30	33	36	39
	7000		25	25	27	30	33	36	39
	8000		26	26	27	30	33	36	39
	9000		28	28	28	30	33	36	39
	10000		29	29	29	30	33	36	39
	11000		30	30	30	30	33	36	39
	12000		31	31	31	31	33	36	39
2200	3000		24	26	30	33	36	41	45
	4000		24	26	30	33	36	41	45
	5000		24	26	30	33	36	41	45
	6000		24	26	30	33	36	41	45
	7000		25	26	30	33	36	41	45
	8000		26	26	30	33	36	41	45
	9000		28	28	30	33	36	41	45
	10000		29	29	30	33	36	41	45
	11000		30	30	30	33	36	41	45
	12000		31	31	31	33	36	41	45

p= pressão de teste em (MPa); L= comprimento em (mm); V= velocidade em (m/min)

Tabela A.9: Espessura de parede calculada para liga SA278CL50.

V(m/min)	P		0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,00
	L								
800	3000		24	24	24	25	27	29	31
	4000		24	24	24	25	27	29	31
	5000		24	24	24	25	27	29	31
	6000		24	24	24	25	27	29	31
	7000		25	25	25	25	27	29	31
	8000		26	26	26	26	27	29	31
	9000		28	28	28	28	28	29	31
	10000		29	29	29	29	29	29	31
	11000		30	30	30	30	30	30	31
	12000		31	31	31	31	31	31	31
1000	3000		24	24	24	25	27	30	32
	4000		24	24	24	25	27	30	32
	5000		24	24	24	25	27	30	32
	6000		24	24	24	25	27	30	32
	7000		25	25	25	25	27	30	32
	8000		26	26	26	26	27	30	32
	9000		28	28	28	28	28	30	32
	10000		29	29	29	29	29	30	32
	11000		30	30	30	30	30	30	32
	12000		31	31	31	31	31	31	32
1200	3000		24	24	24	26	28	30	32
	4000		24	24	24	26	28	30	32
	5000		24	24	24	26	28	30	32
	6000		24	24	24	26	28	30	32
	7000		25	25	25	26	28	30	32
	8000		26	26	26	26	28	30	32
	9000		28	28	28	28	28	30	32
	10000		29	29	29	29	29	30	32
	11000		30	30	30	30	30	30	32
	12000		31	31	31	31	31	31	32
1400	3000		24	24	24	26	28	31	33
	4000		24	24	24	26	28	31	33
	5000		24	24	24	26	28	31	33
	6000		24	24	24	26	28	31	33
	7000		25	25	25	26	28	31	33
	8000		26	26	26	26	28	31	33
	9000		28	28	28	28	28	31	33
	10000		29	29	29	29	29	31	33
	11000		30	30	30	30	30	31	33
	12000		31	31	31	31	31	31	33
1800	3000		24	24	25	28	30	33	35
	4000		24	24	25	28	30	33	35
	5000		24	24	25	28	30	33	35
	6000		24	24	25	28	30	33	35
	7000		25	25	25	28	30	33	35
	8000		26	26	26	28	30	33	35
	9000		28	28	28	28	30	33	35
	10000		29	29	29	29	30	33	35
	11000		30	30	30	30	30	33	35
	12000		31	31	31	31	31	33	35
2200	3000		24	24	27	30	33	36	39
	4000		24	24	27	30	33	36	39
	5000		24	24	27	30	33	36	39
	6000		24	24	27	30	33	36	39
	7000		25	25	27	30	33	36	39
	8000		26	26	27	30	33	36	39
	9000		28	28	28	30	33	36	39
	10000		29	29	29	30	33	36	39
	11000		30	30	30	30	33	36	39
	12000		31	31	31	31	33	36	39

p = pressão de teste em (MPa); L = comprimento em (mm); V = velocidade em (m/min)

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)