

UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Departamento de Física

*Reconhecimento do Padrão
Óptico da Estrutura da
Folha de Papel*

Mário José Teixeira Pereira

Covilhã

2002



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

RECONHECIMENTO DO PADRÃO

ÓPTICO DA ESTRUTURA DA FOLHA

DE PAPEL

POR

MÁRIO JOSÉ TEIXEIRA PEREIRA

Fevereiro de 2002

Trabalho apresentado para a obtenção do Grau de Doutor em Física pela Universidade da Beira Interior, sob a orientação do Prof. Doutor Paulo Torrão Fiadeiro.

*A Nê minha querida esposa
e aos nossos filhos Mário e Vitor
Aos meus Pais e aos meus Sogros
A memória dos meus Avós
e à memória do Professor Doutor José Pinto Peixoto*

Agradecimentos

Esta tese é o resultado do trabalho de investigação que foi desenvolvido sob a orientação do Prof. Doutor Paulo Torrão Fiadeiro, do Departamento de Física da Universidade da Beira Interior.

Este trabalho não teria sido possível sem a preciosa ajuda de algumas pessoas a quem gostaria de aqui manifestar o meu reconhecimento.

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador, Prof. Doutor Paulo Torrão Fiadeiro, pela sua orientação, apoio, disponibilidade, ajuda e amizade demonstrada nas longas noites de trabalho durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Doutor Jean Jacques Silvy pela sua co-orientação, disponibilidade, pela forma como acompanhou a realização deste trabalho, pelo seu apoio e pela ajuda dada nas apresentações dos trabalhos realizados em conjunto.

Quero agradecer à minha colega e amiga Ana Paula Costa do Departamento de Ciência e Tecnologia do Papel da Universidade da Beira Interior, pelo seu apoio na obtenção de amostras e réplicas de folhas de papel e pela sua companhia nas viagens que empreendemos para apresentação dos vários trabalhos realizados em conjunto.

À Unidade de Detecção Remota, à Unidade de Materiais Têxteis e Papeleiros da Universidade da Beira Interior e à Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo apoio financeiro concedido para a realização deste trabalho e à École Française de Papeterie et des Industries Graphiques de Grenoble (EFPG) pela gentileza em fornecer as amostras necessárias dos papéis de referência para a realização deste trabalho.

Quero agradecer aos meus amigos e colegas Rui Manuel Boucho de Oliveira, Miguel Eduardo Pita de Jesus, Luís José Amoreira, Francisco Miguel Pereira Brardo Ferreira, Vasco Miguel Nina de Almeida, Hermínio Gil e à D^a Maria Manuela Raposo do Departamento de Física da Universidade da Beira Interior, pelo seu apoio e incentivo à realização deste trabalho.

À minha colega Ana Paula Gomes do Centro de Óptica da Universidade da Beira Interior pela sua ajuda nos estudos realizados no microscópio electrónico de varrimento e no microscópio metalográfico.

A todos os colegas do Departamento de Física pelo apoio dado à realização deste trabalho.

Quero agradecer de um modo muito especial à minha família, à minha Equipa (ENS Covilhã 8) e a todos os meus amigos pelo constante apoio moral e encorajamento que me demonstraram durante todo este período.

Covilhã, Fevereiro de 2002

Resumo

Devido ao processo de fabrico o papel apresenta uma estrutura anisotrópica da orientação da distribuição das fibras de celulose. A maior parte dessa anisotropia resulta da orientação da distribuição das fibras na superfície da folha de papel. A resistência mecânica dos produtos papeleiros depende fortemente dessa distribuição de orientação das fibras. Variações na orientação das fibras na folha de papel contribuem para a instabilidade dimensional, para diferenças na porosidade e rugosidade e para a diminuição das suas propriedades mecânicas. Devido à importância da distribuição de orientação das fibras no papel, métodos quantitativos para medir o grau e o ângulo de orientação das fibras são fundamentais para a indústria papeleira.

Tendo em atenção este facto, o método proposto e desenvolvido nesta tese pretende ser uma contribuição importante para um melhor conhecimento das estruturas fibrosas. O método está baseado na análise de padrões de difracção produzidos por réplicas transparentes das superfícies da folha de papel.

Os padrões de difracção obtidos com as réplicas das superfícies da folha de papel, apresentam uma forma elíptica característica da estrutura da rede de fibras, com uma elipticidade e orientação específicas relativamente ao eixo maior da elipse o qual é perpendicular à orientação principal da distribuição das fibras.

Com o método implementado para a produção de réplicas, é possível produzir simultaneamente, e portanto nas mesmas condições, réplicas de ambas as superfícies da folha de papel. Através das imagens obtidas por microscopia óptica e por microscopia electrónica de varrimento é possível avaliar a qualidade das réplicas obtidas e concluir-se que são cópias fiéis, embora negativas, das superfícies da folha de papel.

O método aqui proposto mostra a existência de boas correlações com os resultados obtidos por outros métodos para a quantificação da orientação da distribuição de fibras. Este método foi ainda aplicado com sucesso na quantificação da anisotropia e ângulo de orientação em folhas clivadas, em materiais não-tecidos e na detecção de anomalias na distribuição de orientação das fibras à superfície do papel.

Índice

INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 1	4
TÉCNICAS PARA A CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA DA FOLHA DE PAPEL	
1.1 INTRODUÇÃO	4
1.2 MÉTODOS ÓPTICOS	6
1.2.1 Colorimétrico	6
1.2.2 Método da clivagem da folha de papel	8
1.2.3 O Método Lippke-Honeywell.....	8
1.2.4 Difracção de Raios-X.....	10
1.2.5 Método de transmissão de ondas polarizadas.....	12
1.2.6 Método ultra-sónico	15
1.2.7 Método das microondas.....	16
1.2.8 Interferometria holográfica	17
1.2.9 Método de análise de imagem.....	19
1.3 OS MÉTODOS MECÂNICOS.....	21
1.3.1 Método de resistência à tracção	21
1.4 MÉTODOS ÓPTICOS ALTERNATIVOS	22
1.4.1 Difracção da luz laser	22
1.4.2 O Método Proposto	23
1.5 RESUMO	24
REFERÊNCIAS.....	27
CAPÍTULO 2	31
SISTEMA PARA PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS	
2.1 INTRODUÇÃO	31
2.2 FUNDAMENTOS DA IMAGEM DIGITAL.....	32
2.2.1 O Modelo da Imagem	33
2.2.2 Amostragem e Quantificação.....	34
2.3 ELEMENTOS DE UM SISTEMA DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM.....	36
2.3.1 Detectores de Imagem.....	36
2.3.2 Processadores de Imagem	39
2.3.3 Computadores digitais.....	41
2.3.4 Dispositivos de armazenamento.....	42
2.3.5 Dispositivos de visualização e de registo.....	42

2.4	O SISTEMA IMPLEMENTADO	43
2.4.1	Descrição do hardware	44
2.4.2	Descrição do software.....	46
2.5	RESUMO	48
REFERÊNCIAS		49
CAPÍTULO 3		51
CARACTERIZAÇÃO DE REDES DE FIBRAS: O MODELO DO PORO EQUIVALENTE		
3.1	INTRODUÇÃO	51
3.2	ANÁLISE BIDIMENSIONAL DAS ESTRUTURAS FIBROSAS.....	52
3.2.1	As funções de densidade de orientação ponderadas em número.....	53
3.2.2	As funções de densidade de orientação ponderadas em comprimento.....	54
3.2.3	Relação entre as densidades de orientação ponderadas em comprimento e em número	55
3.2.4	A relação da anisotropia e do ângulo médio de orientação em redes de fibras bidimensionais.....	56
3.2.5	Densidade linear de intersecção das fibras	56
3.2.6	O poro equivalente de uma rede bidimensional.....	58
3.2.7	Poros equivalentes em redes bidimensionais	60
3.3	MODELO TRIDIMENSIONAL DA ESTRUTURA DA FOLHA DE PAPEL	62
3.4	RESUMO	67
REFERÊNCIAS		68
CAPÍTULO 4		71
TEORIA DA INTERFERÊNCIA E DA DIFRAÇÃO		
4.1	INTRODUÇÃO	71
4.2	CONDIÇÕES GERAIS	72
4.3	INTERFERÊNCIA E DIFRAÇÃO.....	80
4.3.1	Princípio de Huygens	80
4.3.2	Experiência de Young.....	81
4.3.3	Difração de Fraunhofer e de Fresnel	83
4.4	DIFRAÇÃO DE FRAUNHOFER E TRANSFORMADAS DE FOURIER.....	107
4.5	RESUMO	110
REFERÊNCIAS		111
CAPÍTULO 5		113
RECONHECIMENTO DO PADRÃO DE DIFRAÇÃO		
5.1	INTRODUÇÃO	113
5.2	METODOLOGIA	114
5.3	PARTE EXPERIMENTAL	115
5.3.1	Produção de réplicas transparentes	115
5.3.2	Sistema óptico experimental.....	120

5.3.3.	Especificações do sistema óptico experimental.....	122
5.3.4.	Sistema de varrimento horizontal/vertical.....	127
5.4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	140
5.5	O MÉTODO DA DIFRACÇÃO LASER EM COMPARAÇÃO COM OUTROS MÉTODOS PAPELEIROS	163
5.6	ANÁLISE DA ESTRUTURA INTERNA DE FOLHAS DE PAPEL.....	166
5.7	RESUMO	168
REFERÊNCIAS.....		170
 CAPÍTULO 6.....		172
 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO		
6.1	CONCLUSÕES.....	172
6.2	TRABALHO FUTURO.....	174
 PUBLICAÇÕES.....		176
	ARTIGOS EM REVISTAS DE ESPECIALIDADE	176
	ARTIGOS EM CONGRESSOS E CONFERÊNCIAS	176
	Com apresentação oral.....	176
	Com apresentação em póster	177
 APÊNDICES		178
	APÊNDICE 1	178
	APÊNDICE 2	181
	APÊNDICE 3	186

Introdução

Sendo a orientação da distribuição de fibras um parâmetro importante para a qualidade final do papel, é notório um grande esforço ao nível da investigação aplicada para a implementação de métodos objectivos e rápidos que quantifiquem este parâmetro.

No entanto, mesmo com o conhecimento de tal facto, o controlo de qualidade realizado na grande maioria da indústria papelreira continua a ter em conta somente a gramagem, a espessura, a quantidade de água e de cargas, a opacidade e o brilho do papel. Sempre que se ajusta um dos parâmetros atrás referidos são introduzidas variações não controladas na orientação da distribuição de fibras. Estas variações originam alterações nas propriedades do papel, pelo que se torna imperioso quantificar para se poder controlar.

De um modo geral, a maioria dos métodos existentes na indústria papelreira estão baseados em observações e medições de propriedades específicas do papel e não propriamente na quantificação directa da orientação das fibras na folha de papel. Por forma a medir unicamente a orientação das fibras o método proposto e desenvolvido nesta tese, utiliza réplicas das superfícies da folha de papel. Com estas réplicas são produzidos padrões de difracção representativos da orientação da distribuição de fibras na folha de papel.

A superfície da folha pode então ser caracterizada por métodos ópticos directos e objectivos nos quais o objecto difractor não é a folha de papel mas sim uma réplica da sua superfície. Através do padrão de difracção produzido pela réplica, tem-se acesso à distribuição de orientações das fibras e portanto à sua anisotropia de orientação.

Réplicas de elevada qualidade podem ser obtidas utilizando-se um filme termoplástico. A réplica (negativa) da superfície do papel é obtida pressionando-se o filme, a uma temperatura e pressão controladas, contra a superfície da folha de papel. Imagens microscópicas das réplicas mostram que as réplicas representam fielmente a superfície da folha de papel.

Por forma a obter padrões de difracção de Fraunhofer da superfície das réplicas de folhas de papel, foi desenvolvido e implementado um sistema óptico experimental. Este sistema utiliza um laser de He-Ne, um filtro espacial e uma lente de colimação para produzir um feixe plano e paralelo de luz para iluminar a superfície da réplica. A luz que atravessa a réplica é colectada por uma lente convergente de

grandes dimensões a qual gera um padrão de difracção no seu ponto focal. Um sensor de imagem de estado sólido, colocado nesse ponto, permite realizar a aquisição de imagens das distribuições de intensidade correspondentes ao padrão de difracção. Este sensor de imagem está ligado a uma placa de aquisição, armazenamento e processamento de imagem instalada num computador digital para registo digital das imagens das distribuições de intensidade.

O processo de aquisição e registo é controlado por um programa de aplicação específico que efectua também todo o processamento necessário com os dados armazenados. Em termos de aquisição, e para cada réplica, o sistema óptico experimental foi idealizado para permitir varrimentos controlados através de uma mesa xy motorizada.

Um programa de aplicação regista todos os dados adquiridos correspondentes aos varrimentos efectuados para posterior processamento. Relativamente ao processamento dos dados, o algoritmo aplicado para analisar as distribuições de intensidade dos padrões de difracção, determina o melhor contorno de igual intensidade para calcular em poucos segundos a elipticidade (relação a/b entre os comprimentos dos eixos maior, a , e menor, b) desse contorno e a orientação do seu eixo maior, relativamente à direcção máquina.

Os resultados obtidos para um varrimento completo são apresentados sob a forma de um mapa, onde cada segmento representa uma área/ponto analisado, sendo o seu comprimento proporcional à anisotropia de orientação (elipticidade) e a sua direcção o ângulo de orientação local das fibras.

Nesta tese, relacionada com o desenvolvimento de um método objectivo para a quantificação da anisotropia e do ângulo de orientação das fibras nas folhas de papel, o Capítulo 1, intitulado "*Técnicas para a caracterização da estrutura da folha de papel*", apresenta uma revisão e ao mesmo tempo uma breve descrição das técnicas e métodos utilizados na indústria papelreira para caracterização da estrutura da folha de papel. Os métodos apresentados estão divididos em métodos directos (directamente relacionados com as fibras na folha de papel) e métodos indirectos (os que fornecem observações e medições de propriedades específicas do papel). Nos métodos directos apresentam-se o método colorimétrico e o método de análise de imagem, e nos métodos indirectos apresentam-se o método ultra-sónico, o método da interferometria holográfica, o método do teste à resistência do papel, o método da difracção de Raios-X, o método da transmissão de ondas polarizadas e o método da difracção laser. Os capítulos subsequentes descrevem o seguinte:

No Capítulo 2, intitulado "*Sistemas para processamento digital de imagens*", são descritos de um modo breve os elementos de um sistema de processamento digital de imagem e os fundamentos da imagem digital, bem como o sistema utilizado para processamento digital das imagens obtidas com o sistema óptico experimental.

O Capítulo 3, intitulado "*Caracterização de redes de fibras: O modelo do poro equivalente*", é dedicado à apresentação do modelo do poro equivalente e à base teórica que permite a caracterização da anisotropia e do ângulo de orientação das fibras, tanto à superfície como no volume da folha. É feito um estudo da estrutura bidimensional das redes de fibras, sendo descritas as funções de densidade de orientação das fibras ponderadas em número e em comprimento. A finalizar é efectuada uma breve análise das estruturas tridimensionais.

O Capítulo 4, sobre "*Teoria da Interferência e da Difracção*", apresenta os conceitos e princípios fundamentais sobre os fenómenos da interferência e difracção da luz. São apresentados vários exemplos representativos do fenómeno da difracção, nomeadamente os relacionados com aberturas lineares, rectangulares, circulares e elípticas, estas últimas relacionadas com a modelização da estrutura fibrosa do papel de acordo com o modelo do poro equivalente. Apresenta-se também uma simulação da figura produzida pela reorganização das fibras de acordo com a modelização do poro equivalente, através de uma abertura em forma de anel elíptico com a introdução de uma função de fase. Desta forma, é possível validar os resultados obtidos com o método desenvolvido através das réplicas de papel.

O Capítulo 5, intitulado "*Reconhecimento de padrões de difracção*", está dedicado à apresentação do método óptico de análise desenvolvido e implementado para a caracterização das superfícies do papel através de réplicas das suas superfícies. É apresentada a metodologia que foi implementada na análise de folhas de papel e o método de produção de réplicas do papel. É descrito detalhadamente o sistema óptico experimental e apresentados os resultados obtidos para as várias amostras de papel. A finalizar o capítulo, é apresentada a comparação do método da difracção laser com outros métodos e o estudo realizado sobre a estrutura interna de folhas de papel.

O Capítulo 6, "*Conclusões e trabalho futuro*", apresenta as conclusões deste trabalho e sugere áreas e aplicações possíveis para trabalho futuro.

Finalmente, em "*Publicações*", é apresentada a lista de publicações resultantes deste trabalho tanto de artigos publicados em revistas de especialidade como de artigos apresentados (oralmente e em póster) e publicados em livros de resumo de conferências e congressos da especialidade.

Capítulo 1

Técnicas para a caracterização da estrutura da folha de papel

1.1 Introdução

Este capítulo tem como finalidade a apresentação das várias técnicas e métodos empregues na quantificação da anisotropia e orientação das fibras em folhas de papel. São apresentados vários métodos ópticos e mecânicos directos e indirectos, para a caracterização da estrutura da folha de papel.

A estrutura e propriedades dos materiais fibrosos estão dependentes do modo como os seus constituintes estão distribuídos e interligados entre si tanto à superfície como no seu volume [1-5]. No caso do papel, o material que o constitui, fibras de celulose, é extremamente numeroso e distribuído quase aleatoriamente o que impede a realização de um estudo puramente determinista [6]. A profundidade de penetração das fibras de celulose na estrutura da folha de papel é muito baixa correspondendo em média à espessura de uma ou duas fibras. A estrutura do papel é por isso maioritariamente uma estrutura em camadas [7,8]. Regra geral a folha de papel devido ao seu processo de fabrico apresenta uma estrutura anisotrópica exibindo uma direcção de orientação preferencial para as fibras segundo a direcção de fabrico do papel, conhecida como direcção máquina (*DM*) [9-15]. A maior parte desta anisotropia resulta da distribuição de orientação das fibras no plano da folha. As propriedades físicas, dimensionais e ópticas do papel dependem da orientação das fibras tanto à superfície como no volume da folha [1,9,10,13,16-20].

Sendo a orientação das fibras um dos parâmetros que mais influencia a qualidade do produto final não é de estranhar a existência, quer ao nível da investigação científica quer ao nível financeiro por parte das indústrias do papel e de um modo muito especial nesta última década, de um grande esforço para a implementação de métodos e técnicas que permitam quantificar objectivamente este parâmetro.

O controlo de qualidade na indústria do papel inclui, de um modo geral, a monitorização em tempo real da gramagem, da espessura, da quantidade de água, de cargas, da opacidade e do brilho do papel, mas não inclui a quantificação da orientação das fibras no papel [17]. Para se obter um papel com uma gramagem uniforme as espátulas das caixas de formação são continuamente ajustadas. Estes ajustes introduzem variações não controladas na orientação das fibras [20-21] o que origina alterações nas propriedades do papel. Essas alterações podem significar a diminuição da resistência à tracção e a alteração da sua forma sob a acção da temperatura e da humidade [5,16,20-21].

Os métodos ópticos e mecânicos existentes para a quantificação da anisotropia da folha de papel podem ser divididos em duas classes os directos e os indirectos. Esta separação advém do facto da quantificação resultar duma observação directa da geometria das fibras ou duma observação de propriedades ópticas, mecânicas e da textura correlacionadas com a orientação dessas mesmas fibras. Dentro dos métodos directos incluem-se o método colorimétrico com a inclusão de fibras coloridas e/ou fluorescentes na pasta de papel e o método de análise de imagem ambos por observação directa das fibras. Dentro dos métodos indirectos, podem incluir-se o método ultra-sónico, o método da interferometria holográfica, o método do teste de resistência à tracção do papel, o método da dispersão da luz através das fibras do papel, o método da transmissão de ondas polarizadas no infravermelho longínquo através do papel e o método da difracção de Raios-X, todos eles baseados em observações de propriedades específicas da folha de papel.

Existem ainda outros métodos mais recentes, incluídos na segunda categoria (métodos indirectos), que estão baseados na difracção da luz laser produzida por máscaras de difracção representativas da distribuição das fibras na amostra, na retrodifusão e na transmissão da luz laser através das fibras da amostra de papel.

Um novo método, que será detalhadamente apresentado e descrito ao longo desta tese, para a quantificação da anisotropia e da orientação das fibras à superfície do papel baseado na difracção laser, aplicado não à folha de papel mas às réplicas negativas das superfícies dessa mesma folha de papel. Por esta razão pode incluir-se este método na classe dos métodos indirectos.

A secção 1.2 apresenta e descreve os métodos ópticos existentes para a quantificação da anisotropia da distribuição de fibras da folha de papel. Inclui o método colorimétrico, o método de análise de imagem, o método ultra-sónico, o método da interferometria holográfica, o método da dispersão da luz, o método da transmissão de ondas polarizadas no infravermelho e o método da difracção de Raios-X. Na secção 1.3 é apresentado o método da resistência à tracção que é um método mecânico, enquanto que na secção 1.4 são apresentados os métodos ópticos alternativos incluindo o método da difracção laser e o método proposto. A secção 1.5 inclui um resumo onde são apresentadas as vantagens e desvantagens de cada método.

1.2 Métodos ópticos

Nesta secção descrevem-se os vários métodos ópticos, directos e indirectos, implementados quer na indústria papelreira quer em laboratórios de investigação e desenvolvimento. No que respeita aos métodos ópticos existem o método colorimétrico, o método da clivagem da folha de papel (distribuição da orientação das fibras no volume da folha), o método Lippke-Honeywell (dispersão da luz laser através da folha de papel), o método da difracção de Raios-X, o método ultra-sónico ($TSI_{(MD/CD)}$, TSO), o método submilimétrico (luz polarizada no infravermelho longínquo), o método das microondas, o método da interferometria holográfica, o método de análise de imagem e o método da difracção da luz laser através de micrografias representativas da superfície da amostra. Por fim será apresentado e descrito um novo método óptico baseado na difracção da luz laser produzida através de réplicas da superfície do papel.

1.2.1 Colorimétrico

A inclusão de fibras coloridas e/ou fluorescentes em baixas concentrações, tipicamente de 0,25% para papéis de 60 gm⁻², no processo de formação da pasta de papel permite quantificar a orientação das fibras nas folhas de papel produzidas. Este método, denominado colorimétrico, é uma técnica manual baseada na contagem e classificação de fibras coloridas e/ou fluorescentes distribuídas no papel [9,10, 13,22-24]. Os primeiros trabalhos nesta área foram realizados por Danielsen e Steenberg [22] em papéis produzidos numa máquina Fourdrinier (mesa plana). Nas medições da orientação das fibras foi utilizado um dispositivo com uma pequena abertura central de diâmetro ligeiramente superior ao comprimento da maior fibra existente no papel. Para maior precisão das medições estava incluído na referida abertura um fio fino fixo a um disco graduado. Este dispositivo (pantográfico) encontrava-se acoplado a uma máquina de desenho na qual se fixava o papel a ser estudado. Quando as fibras eram observadas no centro da abertura o disco graduado era rodado até o fio ficar alinhado com o eixo da fibra. O equipamento realizava um varrimento sobre toda a folha de papel registando-se o valor do ângulo indicado no disco graduado para todas as fibras observadas. Como a grande maioria das fibras não são rectilíneas, apresentando-se arqueadas, enroladas ou mesmo dobradas [8,10], os autores depararam-se com situações para as quais o registo do ângulo correspondente ao eixo da fibra era difícil de ser quantificado. Para minimizar os erros cometidos na avaliação do ângulo de orientação das fibras impuseram alguns critérios de medição. Os critérios estipulavam que no caso das fibras se apresentarem dobradas, cada parte rectilínea dessa fibra era tida em conta como sendo uma fibra individual registando-se o valor do ângulo para cada uma delas. No caso das fibras se apresentarem onduladas, o ângulo registado era o ângulo correspondente à direcção média da fibra. Verificaram ainda que era possível obter uma reprodutibilidade satisfatória de resultados se o número de fibras observadas fosse de 2000 fibras por amostra. Após se ter realizado o varrimento de toda a amostra o disco graduado era dividido em intervalos de 7.5° a começar da linha correspondente à direcção

máquina da amostra. Seguidamente contavam o número de fibras dentro de cada intervalo e construíam dessa forma a curva correspondente ao diagrama de distribuição das fibras para cada face de uma amostra. Assim, para Stenberg e Danielsen a distribuição de orientação das fibras era caracterizada pela densidade de orientação ponderada em número de fibras.

Dos resultados que obtiveram foi possível verificar que as fibras estão fortemente orientadas segundo a direcção máquina na face teia, devido à acção da teia nas fibras do papel, enquanto que para a face feltro essa orientação não é tão visível.

No entanto, a distribuição da densidade de orientação das fibras numa folha de papel tem de ser caracterizada de tal forma que a sua influência nas propriedades físicas do papel seja tida em consideração. Como consequência a distribuição de orientação tem de envolver o comprimento acumulado de todas as fibras rectificadas para as várias direcções no plano da folha [1,11]. Desta forma, obtém-se a distribuição da densidade de orientação das fibras ponderada em comprimento.

Por forma a obter esta distribuição ponderada em comprimento Silvy [1] implementou um novo método. Neste método de Silvy, um microscópio e um sistema de coordenadas xy permitem registar a orientação e o comprimento das fibras. O operador mede e regista na memória de um computador os valores correspondentes ao ângulo de orientação e ao comprimento de cada segmento de fibra colorida em análise. Para cada amostra, esta operação é efectuada para 2000 fibras coloridas dispersas sobre toda a superfície o que corresponde a uma área de $2.4 \times 0.15 \text{ m}^2$. Os dados registados são posteriormente agrupados em 18 intervalos de 10° compreendidos entre 0° e 180° . Para cada intervalo calcula-se o número de fibras e o seu comprimento total. Conforme demonstrado por Silvy na teoria do modelo do poro equivalente [1] obtém-se assim uma distribuição de orientação das fibras caracterizada pela densidade de orientação das fibras ponderada pelo comprimento médio dos segmentos em todas as direcções. Este método de medida para segmentos rectilíneos é descrito por Vinatier e Silvy [25].

A anisotropia e a orientação das fibras ponderada em comprimento é calculada pela raiz cúbica entre os valores máximo e mínimo da densidade de orientação. Assim, não se calcula a densidade de orientação do número de fibras mas a densidade de orientação dos segmentos rectilíneos acumulados para cada uma das direcções segundo o conceito do poro equivalente.

Os resultados obtidos com estas técnicas são subjectivos devido a problemas de reproducibilidade para diferentes operadores. Para além deste facto, tem de se ter também em consideração o investimento humano relativamente ao tempo que é necessário despendar para se efectuar a análise de uma amostra. Regra geral, uma análise de 2000 fibras em ambos os lados da amostra demora cerca de 1,5 horas, dependendo do equipamento utilizado.

1.2.2 Método da clivagem da folha de papel

As variações na distribuição da orientação das fibras na espessura do papel contribuem para a existência de problemas de curvatura e estabilidade dimensional no papel quando este está sujeito a variações de temperatura e humidade [16,20-21]. Para se conhecer a distribuição de orientação das fibras através da espessura da folha de papel é necessário dividir-se a folha de papel em várias camadas. A técnica utilizada para a separação da folha é o seccionador de folhas de Beloit o qual permite que se seccione uma folha de 80 μm em 16 camadas diferentes. Um dos problemas subjacente a esta técnica reside no facto de as camadas seccionadas não serem uniformes devido em grande parte às variações na quantidade de material depositado nas primeiras etapas da formação do papel. Kallmes desenvolveu um método simples e prático para a análise da orientação das fibras nas várias camadas obtidas por seccionação [19]. Esse método consiste na determinação da razão entre os resultados obtidos para o teste de resistência à tracção aplicado à direcção máquina e à direcção transversal.

Todas as amostras são humedecidas durante 24 horas e clivadas em 4 camadas sendo depois prensadas e secas. As amostras posteriormente são cortadas em quadrados de $15 \times 15 \text{ mm}^2$, pesadas individualmente e testadas com o equipamento de medição de resistência à tracção (*PULMAC*), registando-se os valores obtidos para as cargas de ruptura para as direcções máquina e transversal (*DM* e *DT*). O valor da anisotropia é dado pela razão entre os valores para as direcções *DM* e *DT*. A distribuição de orientação das fibras pode ser medida em ambas as faces das 4 camadas clivadas pela observação das fibras coloridas adicionadas às amostras. Em Face dos valores obtidos para a anisotropia a conclusão foi de que os valores para as folhas intactas representam aproximadamente a média dos valores obtidos para as várias camadas. Relativamente à distribuição de orientação das fibras a razão entre os comprimentos de ruptura para as direcções *DM* e *DT* fornecem uma medida razoável da anisotropia de orientação das fibras. De salientar que a medida da resistência à tracção só deve ser realizada depois de se terem relaxado as tensões internas existentes nas fibras por exemplo, humedecendo a amostra, uma vez que o valor da resistência à tracção, segundo uma direcção não depende só do número de fibras, mas também do condicionamento em tensão durante a secagem do papel [1,21].

1.2.3 O Método Lippke-Honeywell

Para Mercer [26] o desafio que se coloca à indústria papelreira reside na possibilidade de caracterizar os parâmetros principais do papel, a formação, a resistência à ruptura, a orientação das fibras, a porosidade e a cor em condições dinâmicas, como complemento das técnicas laboratoriais convencionais.

Para evitar os problemas técnicos existentes em outras técnicas, no que diz respeito às dimensões da amostra necessárias para se efectuarem as medições, à limitação dos resultados a dois eixos (direcção

máquina - *DM* e direcção transversal - *DT*) e à influência da variação da gramagem e das cargas na folha de papel, foi utilizado um feixe fino e intenso de luz laser para obter uma medição directa da orientação das fibras e da direcção de máxima orientação na folha de papel.

Relativamente à orientação das fibras, o sistema implementado por Lippke tem por base o fenómeno de dispersão e difusão da luz ao atravessar uma folha de papel. Observou-se que um feixe intenso de luz quando focado na superfície de uma folha de papel a atravessa, sendo disperso e difundido obtendo-se uma mancha luminosa na superfície oposta à superfície de incidência, podendo-se relacionar a sua forma com as orientações locais das fibras [5]. As observações permitiram concluir que a energia é captada pelas fibras individualmente, as quais actuam depois como guias de luz conduzindo a radiação ao longo das fibras na folha de papel devido aos cruzamentos existentes entre fibras [5]. Cada ponto de intersecção entre fibras é um nó de divisão da radiação e o resultado é uma forma luminosa centrossimétrica relativamente ao ponto de incidência.

A mancha de luz difusa observada na superfície oposta à de incidência apresenta em geral uma forma elíptica, no caso de as fibras terem orientação preferencial, e circular, no caso de as fibras estarem aleatoriamente distribuídas. A excentricidade da elipse está relacionada, de acordo com a teoria do poro equivalente [1-5], com a raiz cúbica da proporção de fibras orientadas numa dada direcção estando o ângulo do eixo maior da elipse relacionado com a direcção de orientação predominante das fibras.

No equipamento de Lippke-Honeywell, a montagem óptica consiste num feixe de luz laser colimado com um diâmetro 200 μm e comprimento de onda de 820 nm. A análise da figura resultante da dispersão e da difusão da luz na rede de fibras é efectuada com a ajuda de um detector, contendo seis díodos receptores, que está colocado na face posterior da folha de papel e centrado com o feixe transmitido. O detector está acoplado a um amplificador de sinal o qual por sua vez está ligado a um computador digital para amostragem e processamento dos dados obtidos. Um mecanismo de deslocamento da banda de papel controlado pelo computador permite a obtenção de resultados para a anisotropia e para o ângulo de orientação das fibras com uma resolução da ordem dos 0.7 mm.

Ainda com base nesta técnica (transmissão da luz através da amostra) Silvy *et al.* [4] implementou um novo método para a caracterização da estrutura tridimensional do papel. Adaptou o equipamento Lippke-Honeywell, desenvolvido para a medição da orientação das fibras no plano da folha de papel, por forma a obter medições da anisotropia e orientação das fibras na espessura do papel segundo a direcção máquina e a direcção transversal da folha (ver figura 1-1).

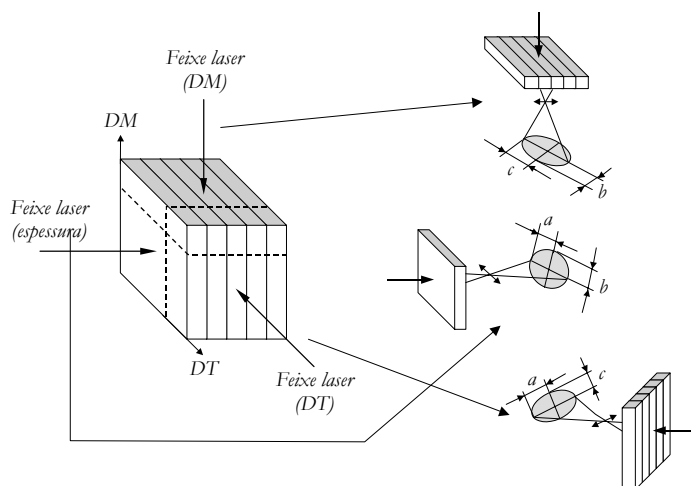


Figura 1- 1 Obtenção da anisotropia de orientação da textura tridimensional do papel por difusão da luz.

Os padrões, de forma elíptica, obtidos pela dispersão da luz na espessura da folha revelaram estarem de acordo com os resultados obtidos directamente por transmissão da luz na folha de papel.

Devido à reduzida espessura de uma folha de papel, entre 50 μm e 100 μm , várias folhas de papel foram empilhadas, compactadas e cortadas formando pilhas de 10 mm de espessura por 0.6 mm de altura, segundo a direcção máquina e a direcção transversal. Este método foi utilizado por Pereira *et al.* [27] na caracterização da estrutura tridimensional de materiais não-tecidos.

1.2.4 Difracção de Raios-X

Os primeiros investigadores a estudarem a relação entre a orientação da parte cristalina dos componentes celulósicos do papel e as suas propriedades físicas e químicas por difracção de Raios-X foram Sisson e Clark [28]. Investigaram a distribuição quantitativa da orientação cristalina em madeira comprimida, seda e algodão. Posteriormente Ruck e Krassig [29], aplicaram esta técnica à determinação da orientação das fibras em papel de jornal, papel multicamada e cartão branqueado. O equipamento utilizado foi um difractómetro de Raios-X a funcionar com radiação K_{α} do cobre. As amostras utilizadas eram tiras rectangulares de papel, empilhadas umas sobre as outras por forma a obter uma espessura adequada e ao mesmo tempo obter uma amostra representativa da orientação das fibras. A área observada correspondia aproximadamente a 5 cm^2 por cada varrimento e o tempo de execução de cada difractograma era de 30 a 40 minutos.

As fibras de celulose são constituídas por quatro camadas principais, denominadas por primária (P), externa secundária (S_1), média secundária (S_2) e interna secundária (S_3) [29, 31]. Cada camada secundária é composta por microfibras longas cujo eixo maior faz um ângulo com eixo da fibra de celulose entre 10° e 45° dependendo do tipo de fibras. Como a maioria do material da parede da célula está contido na

camada S_2 , o difractograma de Raios-X das fibras de celulose resulta quase unicamente desta camada [18,29].

No caso de um forte alinhamento das microfibras ao longo do eixo principal da fibra de celulose verifica-se que o feixe de Raios-X que incida normalmente ao referido eixo produz um padrão de difracção exibindo dois pontos de reflexão muito intensos no plano do equador de acordo com a Lei de Braag [18,29]. Estas reflexões foram denominadas como reflexões 002 paratrópicas. Caso as microfibras não estejam perfeitamente alinhadas, como é o caso do papel, os dois pontos originam dois arcos e no limite duas linhas (ausência de orientação). A distribuição da intensidade ao longo destes arcos é função da forma como as fibras estão distribuídas, donde qualquer parâmetro que caracterize o comprimento do arco 002 será ao mesmo tempo uma medida do grau de orientação.

A partir dos difractogramas de Raios-X das amostras de papel obtidos na posição de reflexão do plano 002 e das considerações anteriores, Ruck e Krassig registaram os ângulos correspondentes às intensidades, a meia altura, das bandas obtidas.

Mais recentemente Prud'homme *et al.* [18] desenvolveram um método para avaliar quantitativamente a distribuição de orientação das fibras de celulose em folhas de papel com base na função de distribuição angular das fibras e na variação de intensidade registada para o plano (002) no difractograma de Raios-X. Assumiram nessa análise que o difractograma de Raios-X das fibras é resultante da camada S_2 unicamente, que as fibras estão todas colapsadas no plano da amostra de tal forma que o difractograma resultante é apenas função das paredes das células perpendiculares ao feixe de Raios-X, que não existe orientação preferencial do plano (002) e que a análise deve ser realizada com base na reflexão produzida pelos planos 002, uma vez que é a mais intensa.

A radiação utilizada foi K_α do cobre e os registos fotográficos foram obtidos com uma câmara de Debye-Scherrer na qual se pode realizar vácuo. As amostras para o difractómetro de Raios-X foram preparadas sobrepondo 4 a 8 tiras de papel com uma espessura total de aproximadamente 0,045 mm, escolhidas aleatoriamente na folha de papel, por forma a obter uma área superficial representativa.

As orientações preferenciais axiais das fibras foram obtidas a partir dos difractogramas de Raios-X, nos quais foram observados anéis concêntricos mais ou menos bem definidos conforme se tratava de uma amostra sem ou com orientação, respectivamente. A distribuição em orientação das fibras na amostra está directamente relacionada com a intensidade registada no difractograma de Raios-X. Deste modo, depois de ser conhecida a função de distribuição angular das fibrilas, obtida por outras técnicas (por exemplo, o método da reflectância num microscópio de polarização), pode ser gerado, através de um computador uma série de curvas teóricas para a intensidade dos Raios-X correspondentes a diferentes parâmetros de orientação. Por comparação da curva obtida experimentalmente com as curvas teóricas é possível determinar o parâmetro de orientação para cada uma das amostras.

A complexidade da instrumentação envolvida e a necessidade do conhecimento prévio da distribuição angular das fibrilas nas paredes das fibras, faz com que este método seja mais utilizado para investigação e desenvolvimento do que em trabalhos de rotina e controlo. Por outro lado, a limitação da espessura das amostras das folhas a algumas dezenas de μm não permite a generalização do método para os diferentes tipos de papel.

1.2.5 Método de transmissão de ondas polarizadas

A medição da anisotropia de orientação das fibras através da absorção de ondas submilimétricas polarizadas com comprimentos de onda entre 50 μm e 100 μm , está baseada no comportamento dicróico (birrefringente) do papel para esses comprimentos de onda. Para esta gama de comprimentos de onda o espectro de absorção de amostras de papel orientadas apresenta um dicróismo relativamente forte e uma baixa absorção quando comparada com o que acontece para o infravermelho próximo e intermédio.

À medida que se roda o plano de polarização das ondas incidentes, em torno do eixo de propagação do feixe, pode medir-se o coeficiente de transmissão para as várias direcções através da amostra. Determinam-se assim os valores máximos e mínimos para a transmissão bem como as direcções que lhes estão associadas. A absorção é máxima (a transmissão é mínima) quando o feixe luminoso incidente está polarizado segundo a direcção de alinhamento máximo das fibras. A razão dicróica, que é função da anisotropia da folha, pode ser calculada a partir dos valores máximo e mínimo da transmissão. A orientação dominante das fibras é obtida a partir da orientação do plano de polarização correspondente ao mínimo de transmissão. Este método fornece um valor médio para a anisotropia, uma vez que se trata de uma análise através da espessura da amostra.

Devido à grande profundidade de penetração da radiação (comprimento de onda do ordem da espessura da amostra) este método não pode ser aplicado em estudos das superfícies das amostras. Este método pode ser dividido em duas técnicas semelhantes a funcionar para diferentes comprimentos de onda: a técnica do infravermelho longínquo (*FIR*) para comprimentos de onda de 70 μm , e a técnica submilimétrica (*SMM*) para comprimentos de onda entre 9 μm e 11 μm .

Infravermelho Longínquo (*FIR*)

Drouin e Gagnon [13,14,32] implementaram uma técnica para a quantificação da anisotropia de orientação das fibras na folha de papel, baseada no comportamento dicróico da celulose na região do infravermelho longínquo. Este comportamento apresenta um máximo na região entre 100 cm^{-1} e os 200 cm^{-1} . O efeito polarizador do papel depende da quantidade de amostra que é colocada no percurso do feixe de infravermelho. Para se distinguir entre a anisotropia das fibras do papel e a absorção da celulose, que depende da gramagem da folha, foi definido um coeficiente anisotrópico de *FIR* tendo

em conta as propriedades de absorção do papel para esses comprimentos de onda. A transmissão média detectada para o feixe *FIR* foi descrita através de:

$$I_T = e^{-k \cdot M} \quad (1-1)$$

onde I_T representa a intensidade da transmissão do *FIR*, k é um parâmetro experimental e M é a gramagem.

Devido à anisotropia de orientação das fibras, a transmissão e por consequência o parâmetro k variam com a diferença angular existente entre o plano de polarização do feixe e a direcção do máximo de orientação das fibras da amostra, normalmente o sentido máquina. Como a área iluminada pelo feixe é constante, a gramagem também é constante. Foi definido então um coeficiente de anisotropia, como sendo a razão entre os valores máximo e mínimo do parâmetro k . Verificou-se que este coeficiente assumia um valor unitário para papéis isotrópicos e valores superiores à unidade para papéis anisotrópicos. Este coeficiente era independente da gramagem da amostra e podia ser expresso através da razão entre os valores máximo e mínimo da transmissão. De notar que este valor para o caso da anisotropia, não calcula a repartição de orientação mas corresponde a uma correlação observada. Não existem escalas de orientação definidas para este método.

Como a situação de mínimo de transmissão ocorre quando as fibras estão na sua maioria orientadas paralelamente ao plano de polarização do feixe, o ângulo correspondente a este mínimo indica a orientação dominante das fibras na folha. Como a água tem uma forte absorção na região dos 100 cm^{-1} as medições foram realizadas em papéis acondicionados possuindo um conteúdo de água uniforme. Desta forma foi evitada a possível influência da água nas medições.

Nas primeiras experiências foi utilizado como fonte luminosa um laser de infravermelho longínquo, pulsado, emitindo nos 70 μm . No entanto, tendo em consideração os custos e a aplicabilidade à indústria foi decidida a utilização de uma fonte corpo negro filtrada a trabalhar a 1300 K. A utilização de um corpo negro como emissor no infravermelho em vez da radiação laser permitiu o desenvolvimento das aplicações desta técnica [32-33]. O sistema está equipado com um disco que permite a utilização de aberturas até 25 mm de diâmetro. O feixe depois de passar por uma obturador mecânico atravessa um filtro passa banda que transmite na região dos 50 μm aos 100 μm . O filtro tem associado um polarizador linear estando o conjunto colocado o mais próximo possível da fonte de luz. Detectores de elevada sensibilidade e amplificadores de sinal completam o sistema experimental. A distância entre o filtro e o detector é normalmente inferior a 10 mm. A resolução espacial é determinada por uma íris posicionada atrás da amostra podendo o seu diâmetro ser ajustado entre 1 mm e 25 mm.

A frequência do obturador mecânico varia entre 16 Hz e 100 Hz dependendo da intensidade do feixe que chega ao detector. Esta intensidade é função da espessura da amostra e da resolução espacial seleccionada. Para se medir a transmissão em função do ângulo entre o campo eléctrico e a direcção

máquina da amostra o conjunto polarizador-filtro estava montado num suporte rotativo motorizado rodando entre 12 rpm a 15 rpm. A fonte como não é polarizada, produz um feixe de intensidade constante à medida que se roda o plano de polarização. A amostra está montada num suporte que permite movimentos de translação. Um computador digital controla a aquisição e a análise dos dados bem como os movimentos de rotação do sistema polarizador-filtro e de translação da amostra.

Com este método podem ser caracterizados cinco pontos diferentes da amostra em 1 minuto. Esta técnica pode também ser utilizada em amostras com gramagens entre os 10 gm⁻² e os 500 gm⁻².

Método submilimétrico

Esta técnica foi desenvolvida por Bergeron *et al.* e por Drouin *et al.* [15,32] e está baseada na técnica *FIR*. Utiliza uma fonte de luz laser submilimétrica (*SMM*) polarizada para detectar e medir a anisotropia das fibras no papel. Esta fonte é constituída por um laser gasoso de CH₃OH bombeado por um laser de CO₂. O laser de CO₂ pode operar em modo contínuo ou pulsado sendo a sua potência máxima de saída igual a 50 W em modo contínuo. A selecção do comprimento de onda submilimétrico entre 9 μm e 11 μm [35], é conseguida ajustando convenientemente ambos os lasers. O feixe *SMM* que emerge do conjunto é não polarizado tornando-se linearmente polarizado por acção de um polarizador linear, sendo de seguida parcialmente reflectido por um divisor de feixe em direcção a um detector de referência enquanto que a parte do feixe que foi transmitida é colectada por uma lente convergente, atravessa a amostra de papel e por fim é captada por um outro detector. A lente convergente permite ajustes nas dimensões do feixe que incide no papel. O tipo de montagem para a amostra depende da finalidade a que se destina a medição. Para medições de anisotropia, a amostra é montada num suporte rotativo perpendicularmente à direcção do feixe laser.

A transmissão é medida em função do ângulo entre a direcção máquina da amostra e o plano de polarização do feixe. A transmissão atinge o seu valor máximo quando a direcção máquina da amostra é perpendicular ao plano de polarização do feixe. Para o cálculo da anisotropia registam-se as intensidades transmitidas quando a amostra tem a sua direcção máquina paralela e depois perpendicular ao plano de polarização. Através da razão entre estas duas intensidades determina-se o grau de anisotropia *SMM* para as fibras no papel.

Este método pode ser utilizado para quantificar variações locais da anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras [32-35]. Para esse efeito a amostra de papel é montada numa plataforma de translação linear e o feixe *SMM* é polarizado verticalmente e ajustado para 5 mm de diâmetro. Efectuam-se leituras para a intensidade transmitida de 2 em 2 mm através de um computador que controla a plataforma. A amostra regressa depois à posição inicial e o procedimento repete-se agora com o feixe polarizado horizontalmente. O método *SMM* é rápido, não destrutivo, e aplicável a uma grande variedade de papéis. As dificuldades deste método residem nas grandes dimensões do laser, na necessidade de haver estabilidade e na necessidade de maior facilidade de utilização e manutenção.

1.2.6 Método ultra-sónico

Este método foi desenvolvido após 1967 e deu lugar ao aparecimento de equipamentos de medição em laboratório que permitem uma rápida obtenção de resultados indicativos das propriedades elásticas do papel, e por conseguinte e indirectamente, sobre a orientação das fibras [36-38]. Este método consiste na transmissão de um sinal ultra-sónico através da superfície do papel sendo a detecção do sinal realizada através de um sensor múltiplo contendo oito pares de emissores/receptores dispostos em circunferência e espaçados de 22.5° entre eles. Registando-se o tempo que demora o sinal transmitido a chegar do emissor ao receptor e conhecendo-se a distância entre eles é possível calcular a velocidade de propagação do sinal ultra-sónico, para cada uma das direcções correspondentes aos oito pares de emissores/receptores. Esta velocidade é proporcional ao módulo elástico específico da amostra para essas direcções [5,13,21,36-38], de acordo com a equação

$$v_{\theta} = \sqrt{\frac{E_{\theta}}{\rho}} \quad (1-2)$$

onde v_{θ} representa a velocidade de propagação do sinal ultra-sónico, E_{θ} representa o módulo elástico e ρ a massa específica.

O resultado final desta medição traduz-se numa figura cujo contorno é apresentado na figura 1-2. O contorno desenhado representa a elasticidade em todas as direcções do plano da amostra. Assim, é possível identificarem-se as direcções onde o índice de elasticidade (TSI – “*Tensile Stiffness Index*”) é máximo e onde é mínimo (TSI_{MAX} e o TSI_{MIN}).

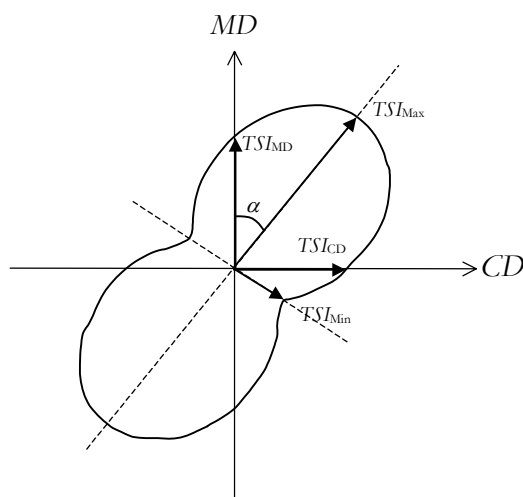


Figura 1- 2 Figura representativa da variação da elasticidade obtida pelo método ultra-sónico.

Normalmente a indústria papelreira interpreta a direcção de máxima elasticidade como sendo igual à direcção de orientação máxima das fibras. De um modo geral, a direcção máquina (de fabrico do papel) coincide com a direcção de elasticidade máxima desde que o processo de secagem do papel se efectue

sem que este esteja sujeito a tensões ou elongações. No entanto, caso o papel não possa secar livremente, como é o caso do papel produzido industrialmente, as duas direcções podem não coincidir sendo a diferença angular existente entre elas (α) denominada de ângulo de orientação da elasticidade (*TSO* – “*Tensile Stiffness Orientation*”). Nesta situação, em que a direcção de máxima elasticidade não coincide com a direcção máquina, para além da quantificação dos valores de TSI_{MAX} e TSI_{MIN} , também se determinam os valores da elasticidade para a direcção máquina e para a direcção transversal (TSI_{MD} e TSI_{CD}).

Um outro parâmetro que deriva da análise ultra-sónica é a razão entre os índices de elasticidade para a direcção máquina e para a direcção transversal ($TSI_{MD/CD}$), que para a indústria papelreira está relacionada com a anisotropia de orientação das fibras. Tal como para o ângulo de orientação, o valor de $TSI_{MD/CD}$ só é igual à anisotropia de orientação das fibras se o papel puder secar sem estar sujeito a tensões e elongações, o que não acontece para o papel industrial, que está sujeito a tensões internas e elongações introduzidas pela máquina de produção de papel. Para o papel industrial o valor de $TSI_{MD/CD}$ é resultante da anisotropia de orientação das fibras e das tensões internas e elongações existentes na folha de papel [21,37], não sendo portanto correcto quantificar a anisotropia de orientação das fibras através do valor de $TSI_{MD/CD}$.

As especificações requeridas para o ângulo *TSO* variam dependendo da qualidade final do papel. Essas especificações são mais rigorosas para o papel destinado a fotocopiadoras e impressoras laser.

O ângulo *TSO* fornece também informação sobre a tendência que uma folha de papel tem para curvar quando existem variações de humidade, coincidindo com o problema de ondulação da folha de papel. A existência ou não de curvatura na folha de papel depende das características das duas faces da folha determinadas pela formação e secagem durante o processo de fabrico.

Os valores aceites pela indústria do papel para o ângulo *TSO* são $\pm 2 - 3^\circ$ para papel de fotocópia e impressão laser e $\pm 3 - 5^\circ$ para papel de jornal e papel para litografia de impressão [37].

1.2.7 Método das microondas

Este método de quantificação do ângulo de orientação da distribuição de fibras em papel foi desenvolvido por Tiuri e Liimatainen [39]. É um método que utiliza uma cavidade ressonante de microondas a operar nos modos TE_{101} e TE_{011} com frequências de ressonância iguais e campos eléctricos mutuamente perpendiculares. O ressonador está dividido em duas partes para se poder introduzir a amostra da folha de papel.

A amostra de papel é posicionada dentro da cavidade ressonante por forma a que possa rodar e os campos eléctricos de ambos os modos estejam no plano da amostra. A introdução da amostra de

papel (de uma forma geral anisotrópico) entre as duas cavidades de ressonância origina uma variação nas duas frequências de ressonância. Conhecendo-se a diferença de fase entre os dois sinais de saída, a variação na frequência e a largura da banda dos modos do ressonador em função do ângulo de rotação da amostra, pode obter-se um valor para a anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras.

O sistema experimental de ressonância consiste num cubo ressonante com 6.3 cm de lado (frequências de ressonância aproximadamente de 3.4 GHz) com possibilidade de ajuste dos dois modos TE_{101} e TE_{011} do ressonador quando está vazio, para se igualarem as duas frequências de ressonância.

Recentemente um novo sistema para medição do ângulo de orientação da distribuição de fibras em folhas de papel baseado na mesma técnica, foi implementado por Varpula [17]. Neste novo método a amostra permanece fixa contrariamente ao método proposto por Tiuri e Liimatainen [39].

Neste método o ressonador é uma cavidade cilíndrica de alumínio, dividida pelo plano equatorial em duas partes para inclusão da amostra de papel, a operar com uma frequência entre 2.3 GHz a 2.5 GHz. O algoritmo de processamento permite executar uma rotação completa do campo eléctrico no ressonador e determinar a frequência de ressonância e a largura da banda de ressonância para cada ângulo. Com base nestes valores é calculado o ângulo de orientação da distribuição de fibras por ajustamento da curva de distribuição obtida experimentalmente a uma parábola. A anisotropia da distribuição de fibras é calculada pela razão dos valores obtidos para a direcção correspondente ao ângulo de orientação da distribuição de fibras e para a direcção que lhe é perpendicular. O sistema é calibrado utilizando-se amostras de papéis isotrópicos.

A rapidez deste sistema é suficiente para que possa ser incorporado para efectuar varrimentos na máquina de fabrico de papel. A incerteza nos valores para o ângulo de orientação da distribuição de fibras é de 0.4° se o ângulo de orientação da distribuição de fibras estiver entre $\pm 15^\circ$ relativamente à direcção máquina.

1.2.8 Interferometria holográfica

A interferometria holográfica é utilizada no estudo da propagação de ondas circulares em placas e folhas. Olofsson *et al.* [40] aplicaram esta técnica ao estudo das propriedades mecânicas do papel visto terem verificado que o papel se comportava como uma placa antes e depois de um impacto na sua superfície.

A montagem experimental consiste de um electroímã e de um pêndulo balístico a ele associado dirigidos para a amostra (folha de papel). A esfera de aço do pêndulo balístico (5 mm de diâmetro) passa através de um feixe laser de He-Ne que está dirigido a um fotodiodo. A interrupção deste feixe laser faz com que um outro laser, de rubi, envie o seu primeiro pulso na direcção da amostra para

efectuar a primeira exposição de um holograma de dupla exposição. Esta primeira exposição ocorre antes de a esfera embater na folha de papel. Quando se dá o impacto da pequena esfera de aço com a superfície da folha de papel são produzidas ondas circulares na sua superfície. Um outro pulso do laser de rubi efectua a segunda exposição. Estes pulsos do laser de rubi estão desfasados entre $1 \mu\text{s}$ e $800 \mu\text{s}$ para se poder observar a evolução das frentes de onda originadas pelo impacto da esfera de aço com a folha de papel. Desta forma é possível registar uma série de hologramas se a experiência for repetida para diferentes desfasamentos.

Num osciloscópio podem observar-se os pulsos do circuito que integra o pêndulo balístico e do laser de rubi. Ao tempo de duração do impacto com a amostra (no caso do papel 1.5 ms) atribui-se uma variável t , enquanto que ao tempo que medeia entre o impacto inicial e a emissão do segundo pulso do laser é atribuída uma variável t' . A duração do pulso do laser de rubi (tempo de exposição) é da ordem dos 25 ns imobilizando as ondas circulares em propagação no holograma.

Na imagem reconstruída do holograma de dupla exposição, a placa objecto está preenchida com um conjunto de franjas cosinusoidais. Essas franjas de interferência representam os contornos de igual deslocamento fora do plano da amostra. O padrão de interferência apresenta máximos e mínimos os quais vão diminuindo de amplitude até que a onda se torna plana com amplitude zero. A menor amplitude detectável com esta montagem localiza-se a uma distância 100 nm a partir do centro do padrão. Componentes de frequências elevadas com amplitudes mais pequenas podem existir mas não são detectáveis.

Durante o impacto, o pulso aumenta na parte central propagando-se para a periferia. Depois do tempo de impacto t e até que a onda tenha atingido a aresta da amostra, a deflexão no centro é constante e a onda move-se para a periferia como se não existisse nenhuma margem. Seguidamente, as ondas começam a ser reflectidas a partir das arestas para o centro e vão interferir com as ondas que se deslocam do centro para a periferia, criando um padrão que se assemelha a uma onda estacionária. Para amostras possuindo um determinado grau de anisotropia da distribuição de fibras o padrão resultante apresenta um padrão constituído por anéis elípticos concêntricos. As ondas possuem velocidades de propagação diferentes para direcções diferentes. Fallstrom *et al.* [41] mostraram que essa anisotropia da distribuição de fibras é proporcional ao quociente entre os dois raios de anisotropia (distâncias radiais ao ponto de impacto para as direcções onde a velocidade atinge o seu valor máximo e o seu valor mínimo) elevado à quarta potência $(r_{\text{max}}/r_{\text{min}})^4$.

Os resultados obtidos mostraram que este método pode ser utilizado para se medir a anisotropia da distribuição de fibras, para se determinar as direcções principais (máquina e transversal) e para se examinarem variações locais no papel através das perturbações existentes nos padrões dos interferogramas. Essas variações resultam principalmente de variações locais nos parâmetros da amostra, nomeadamente na densidade, espessura e módulo de elasticidade. Para Olofsson *et al.* [40], os padrões holográficos revelam a anisotropia da distribuição de fibras da folha de papel.

1.2.9 Método de análise de imagem

As técnicas de análise de imagem estão amplamente divulgadas não existindo, actualmente, um único ramo da ciência onde não se empregue, de algum modo, o processamento de imagem, sendo a indústria do papel um bom exemplo deste facto.

Um dos métodos de análise de imagem desenvolvido por Linnet *et al.* [42] com vista à quantificação da anisotropia de orientação da distribuição de fibras do papel tem por base a análise do padrão observado por transmissão da luz através de uma amostra de papel como uma função do ângulo de rotação.

Neste método são adquiridas imagens da textura do papel a baixa ampliação (2×) com luz transmitida. A medição da orientação da distribuição de fibras efectuada a partir da textura das imagens registadas, utiliza a informação obtida das transformadas de Fourier dessas mesmas imagens. Essa informação, magnitude a 2D, é depois convertida em informação angular e radial. Dessa forma para cada direcção de observação e para cada frequência radial regista-se uma amplitude correspondente. Para a quantificação da orientação da distribuição de fibras, a resposta média obtida da transformada de Fourier, numa dada direcção, é calculada para a região para o intervalo entre 0° e 180° em passos de 1°. Esta informação é apresentada sob a forma de um gráfico fornecendo indicações sobre a dispersão de energia para as diferentes direcções. Esse gráfico exhibe uma forma plana no caso de texturas isotrópicas, apresentando um pico bem explicito centrado sobre o ângulo de orientação médio da distribuição de fibras no caso de texturas orientadas. A largura deste pico está relacionada com o grau de alinhamento existente entre as fibras. Ajustando a curva representativa da banda por meio de uma Gaussiana, o valor médio dessa Gaussiana corresponde à orientação média da distribuição de fibras, enquanto que a sua variância é uma medida da forma como as fibras se encontram alinhadas na amostra. A razão entre os valores máximo e mínimo observados na curva da dispersão de energia para as diferentes direcções, é a medida da anisotropia da distribuição de fibras da amostra.

Recentemente Mignot [43] desenvolveu um método para medição directa da orientação da distribuição de fibras também com base na análise de imagem. O objectivo era a implementação de métodos directos baseados na observação de fibras coloridas na folha de papel. Para isso foi adicionada uma pequena fracção de fibras coloridas à pasta de papel antes da formação da folha de papel. As fibras coloridas podem ser facilmente diferenciadas das restantes fibras que constituem a folha de papel.

A aquisição de imagens da folha de papel é realizada através de luz transmitida, sendo as imagens digitalizadas e armazenadas num computador digital. Posteriormente são transformadas por forma a realçar as fibras coloridas e efectuar o processo de medição.

As imagens são adquiridas através de um detector de estado sólido (CCD) acoplada a um microscópio ou a uma mesa iluminada. No entanto, como a área da amostra observada pela câmara de vídeo era reduzida e as dimensões da imagem eram muito limitadas, tornou-se necessário registar um grande número de imagens para diferentes posições da amostra para assegurar a observação de um número suficiente de fibras coloridas. Desta forma o processo tornou-se bastante moroso.

Para minimizar este problema as imagens da folha de papel passaram a ser obtidas através de um digitalizador de imagem de alta resolução. Assim, era possível a obtenção de imagens coloridas, ou em tons de cinzentos com as dimensões de uma folha de formato A4 e com uma resolução de 1200 pontos por polegada.

Após a aquisição e processamento da imagem original o resultado é a obtenção de uma imagem binária (preto e branco) onde os pixels correspondentes às fibras coloridas estão representadas a branco sob um fundo preto. Com esta imagem é possível analisar a forma das fibras coloridas para medição do comprimento e da orientação das fibras, ou para a determinação do número de intersecções entre as fibras coloridas existentes na imagem binária e um padrão de linhas rectas com uma determinada orientação.

Para se determinar o comprimento e orientação de uma fibra que não seja linear o procedimento normal seria a rectificação dessa fibra em pequenos segmentos lineares os quais seriam medidos separadamente, calculando-se posteriormente o comprimento total da fibra. Para a orientação, conhecidas as orientações de cada um dos segmentos lineares pode calcular-se a orientação correspondente à fibra total. Os valores obtidos são valores aproximados uma vez que resultam da determinação do comprimento e orientação do eixo maior de uma elipse gerada com o mesmo momento de inércia da área visualizada.

As medições são efectuadas dividindo-se o intervalo angular 0° - 180° em 18 intervalos iguais. As medidas dos segmentos são distribuídas pelos diversos intervalos de acordo com a sua orientação. Finalmente calcula-se o comprimento acumulado dos segmentos para cada intervalo. Com os valores calculados para cada um desses 18 intervalos pode obter-se um gráfico correspondente à densidade de orientação ponderada em comprimento. Com a curva obtida e recorrendo ao modelo do poro equivalente de Silvy [1] é possível determinar os valores experimentais para a anisotropia de orientação da distribuição de fibras e para a direcção do máximo de orientação das fibras da amostra em questão.

Como o processo de análise de imagem realiza uma média da forma da fibra em vez de a decompor em segmentos lineares, os resultados obtidos para a orientação global além de serem aproximados são sempre superiores aos valores calculados a partir das orientações dos segmentos coloridos que compõem a fibra. Para ultrapassar esta limitação Mignot considerou uma abordagem diferente utilizando as propriedades da densidade de intercepção linear e a sua relação com o poro equivalente como demonstrado por Silvy [1]. Deste modo, os parâmetros necessários à determinação da orientação

da distribuição de fibras são o número de intersecções existentes entre fibras e linhas com uma direcção previamente definida e o comprimento acumulado das linhas para as diversas direcções. Construindo um gráfico correspondente à densidade linear de intercepções e fazendo o ajuste da curva através do modelo do poro equivalente pode determinar-se a anisotropia e o ângulo de orientação da distribuição das fibras. Os resultados obtidos com esta abordagem, para definir o eixo principal de orientação de cada fibra, são mais razoáveis relativamente aos obtidos com o método das características de inércia que fornecem um valor médio para a orientação principal de cada fibra.

1.3 Os métodos mecânicos

1.3.1 Método de resistência à tracção

Neste método amostras de papel com largura de 15 mm a 25 mm, são sujeitas a uma tensão elevada por meio de duas garras mantidas a uma distância muito reduzida. O equipamento utilizado é um aparelho de tracção pelo que o método é denominado de resistência à tracção à distância zero devido à reduzida distância entre as garras que sustentam as amostras de papel [1,19,24,32]. A resistência à tracção à distância zero é igual à resistência à tracção efectiva das fibras que se encontram presas entre as garras do equipamento e que depende da resistência real das fibras e da sua distribuição de orientação. De seguida é aplicada uma força de tracção registando-se o valor da força para a qual se dá a ruptura do papel. Efectuando este teste para várias direcções obtém-se uma curva representativa da dependência da tracção aplicada com a direcção das fibras. As amostras de papel são previamente humedecidas com água a fim de eliminar os efeitos de pré-constrangimento adquiridos pelas fibras no decurso da secagem do papel. Estes pré-constrangimentos que dependem das tensões exercidas sobre a folha na máquina de papel modificam a resistência à ruptura de um modo diferente consoante a direcção em relação ao sentido máquina. Deste modo, o valor da relação da anisotropia mecânica medida sobre o papel no estado seco é diferente da determinada pelas medidas que caracterizam a orientação geométrica das fibras. O humedecimento do papel tem como finalidade atenuar ou se possível eliminar totalmente os pré-constrangimentos. A determinação da anisotropia da distribuição de fibras do papel efectua-se com base na medição das tensões de ruptura do papel, à distância zero, para a direcção máquina e para a direcção transversal, sendo o seu valor proporcional à razão entre essas duas quantidades, como foi demonstrado por Silvy [1], e é dado pela expressão

$$\frac{a}{b} = \left(\frac{T_{DM}}{T_{DT}} \right)^{0,55} \quad (1-3)$$


onde T_{DM} e T_{DT} representam as tensões de ruptura do papel, à distância zero, para as direcções máquina e transversal, respectivamente.

1.4 Métodos ópticos alternativos

1.4.1 Difracção da luz laser

A dispersão e a absorção da luz visível através da estrutura do papel originam padrões luminosos difusos mais ou menos intensos dependendo da estrutura e espessura do papel. Os métodos baseados nestas técnicas são métodos indirectos fornecendo valores médios para a anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras no papel. Várias aplicações comerciais funcionam com base nestas técnicas para o estudo da gramagem, das propriedades ópticas e das propriedades estruturais do papel.

Os padrões de difracção resultantes de cada uma das fibras de papel, tal como os padrões de difracção produzidos por fendas finas, apresentam funções de distribuição de intensidade da luz dispersa com zonas de máximos e mínimos consecutivos no plano perpendicular à orientação da fibra [44-46]. A possibilidade de medir a orientação da distribuição das fibras por difracção da luz depende da distribuição espacial dos elementos dispersores em cada fibra. A luz dispersa pelas fibras pode ser colectada no plano focal de uma lente e analisada através de uma abertura rotativa num fotomultiplicador, ou fotograficamente por microdensitometria. A forma do padrão de difracção revela claramente a orientação preferencial da distribuição das fibras [44-46]. No entanto, este método tem limitações práticas devido à opacidade das folhas de papel.

Desta forma e tendo por base o princípio da difracção da luz laser, Rudstrom e Sjolín [45] desenvolveram um método para a determinação da orientação da distribuição das fibras em papel com o objectivo de complementar os métodos até aí existentes. O desenvolvimento de técnicas  a utilização de luz laser permite a utilização de feixes de intensidade elevada e com um elevado grau de coerência o que é extremamente difícil de se obter com fontes de luz convencionais. Estas duas propriedades da luz laser são de fundamental importância para a aplicabilidade desta técnica.

Com este método é possível medir-se a orientação da distribuição das fibras em folhas de papel de baixa gramagem através do registo da intensidade transmitida quando a luz laser atravessa a folha de papel. A intensidade da luz para um determinado ângulo de orientação é assumida como sendo função do número de fibras ou agregados de fibras existentes no papel para esse ângulo específico.

O estudo teve início com a observação dos padrões de difracção produzidos por fios finos quando colocados no percurso de um feixe de luz laser colimado. Nestes padrões era observada a perpendicularidade do padrão de difracção relativamente à posição do objecto e o aparecimento de máximos e mínimos que correspondiam aos padrões difracção típicos de fendas. O estudo foi alargado a diferentes objectos e à observação dos padrões que originavam. Verificou-se que a localização do objecto não influenciava o espectro de intensidade. O passo seguinte foi a observação do que acontecia quando se iluminava uma folha de papel fina. O resultado obtido foi um padrão de difracção orientado

segundo uma direcção perpendicular à orientação da distribuição das fibras na folha. Com um detector foi possível registar os valores da intensidade do padrão de difracção em função do ângulo de varrimento. A representação gráfica dessas intensidades mostrou que a distribuição da orientação das fibras apresentava máximos e mínimos correspondentes à anisotropia e ângulo de orientação da distribuição das fibras na folha.

O equipamento utilizado consistia de um laser e de um sistema de expansão e colimação do feixe laser por forma a obter uma frente de onda plana para iluminar a folha de papel. Toda a luz que incidia e era dispersa pela folha de papel era colectada por uma lente que a focava no plano de Fourier. Esta lente cria assim um padrão de difracção no seu ponto focal onde está colocada uma fenda rotativa com 10 cm de comprimento e 0.5 mm de espessura e que pode rodar com uma velocidade angular constante varrendo todo o espectro de intensidade. A luz ao passar pela fenda era detectada por um fotomultiplicador e registada em função do ângulo de varrimento. Para evitar a visualização do máximo central e para este não se sobrepor e ofuscar o restante espectro, a fenda rotativa possui uma máscara opaca na parte central.

Este método é relativamente rápido e pode ser aplicado ao estudo de papéis comerciais de baixa gramagem, sem haver a necessidade de se adicionarem fibras coloridas. Uma das limitações do método prende-se com a gramagem do papel visto que os papéis de gramagens médias tornam-se opacos à luz. Para esses casos torna-se necessário efectuar uma clivagem de várias camadas à folha de papel.

1.4.2 O Método Proposto

O método proposto é um novo método óptico baseado na análise de padrões de difracção laser produzidos por réplicas transparentes das superfícies das folhas de papel para a medição da anisotropia e do ângulo de orientação da distribuição de fibras em ambas as superfícies. Por esta razão pode incluir-se este método nos métodos indirectos. Se uma réplica transparente da superfície da folha de papel for iluminada por feixe colimado de luz laser (uma frente de onda plana) é possível criar um padrão de difracção de Fraunhofer focando o feixe de luz difractado pela réplica através de uma lente convergente. O padrão de difracção assim obtido apresenta uma forma elíptica com uma elipticidade e orientação específicas, em que o eixo maior da elipse (eixo principal) é perpendicular à direcção de orientação principal das fibras. Se for conhecida a elipticidade do padrão de difracção e a direcção de orientação do seu eixo maior pode medir-se a anisotropia e o ângulo de orientação preferencial da distribuição de fibras. Estes dois parâmetros são suficientes para representar a distribuição das fibras da maior parte dos papéis comuns, e está de acordo com a teoria do poro equivalente de Silvy [1].

Os resultados obtidos são representativos das superfícies da folha de papel, podendo o método ser também aplicado para as camadas internas por clivagem da folha de papel, aos têxteis e aos não tecidos [28]. A sensibilidade conseguida com este método na quantificação da anisotropia e do ângulo de

orientação da distribuição de fibras nas superfícies bem como a precisão dos resultados obtidos e a sua reprodutibilidade faz deste método uma grande contribuição para a investigação e desenvolvimento das estruturas fibrosas.

Por forma a medir unicamente a orientação da distribuição de fibras, esta tese tem por objectivo a apresentação de um novo método, baseado em réplicas da superfície da folha de papel, que quantifica a anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras na superfície da folha de papel. No capítulo 3 é apresentado o modelo do poro equivalente através do qual é possível efectuar-se a caracterização da distribuição de fibras no papel. As simulações relativas à distribuição de fibras no papel são apresentadas e discutidas no capítulo 4. No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos com o método proposto para a anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras, e as aplicações práticas referentes ao estudo das propriedades do papel.

Dado que as técnicas e métodos mais divulgados só efectuem a análise de orientação da distribuição de fibras na superfície ou no volume da folha e que só muito recentemente surgiram algumas técnicas capazes de efectuar a análise de ambos os parâmetros atrás referidos [47], não possuindo no entanto a resolução necessária para a avaliação da qualidade do papel, está a ser desenvolvido um método, baseado na retrodifusão da radiação laser pela superfície e na sua transmissão através da folha de papel, capaz de registar a informação em simultâneo e para o mesmo ponto da orientação da distribuição das fibras nas duas superfícies e no volume da folha de papel.

O sistema utiliza para a análise superficial da folha de papel a luz laser dispersa por retrodifusão a partir das superfícies do papel e a luz laser transmitida através da folha de papel para a análise no seu volume. O sistema implementado permite a realização de um mapeamento ponto por ponto. Os padrões obtidos por retrodifusão e por transmissão são adquiridos por dois sensores de imagem ligados a um computador digital, obtendo-se posteriormente a anisotropia e o ângulo de orientação da distribuição de fibras tanto nas superfícies como no volume da folha de papel.

1.5 Resumo

Dada a importância da anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras nas propriedades mecânicas, ópticas e de estabilidade dimensional das folhas de papel é muito importante que existam métodos rápidos e precisos que as quantifiquem.

Neste capítulo consideraram-se tanto os métodos directos (baseados na observação directa das fibras) como os indirectos (baseados na observação de propriedades ópticas, mecânicas e de textura correlacionadas com a orientação das fibras) para a quantificação da anisotropia e ângulo de orientação da distribuição das fibras em folhas de papel. Todos os métodos apresentados têm

vantagens de desvantagens e requerem uma manipulação estatística para se obterem os resultados finais para os parâmetros referidos.

Os primeiros desenvolvimentos realizados por Danielsen e Steenberg resultaram na implementação de um sistema rotativo para medirem directamente a orientação da distribuição de fibras coloridas (método colorimétrico) adicionadas à pasta de papel durante a formação da folha em percentagens inferiores a 1% de acordo com a gramagem do papel. Seguiram-se outros autores que introduziram alterações ao sistema anterior com base também na medição da orientação da distribuição e comprimento das fibras coloridas. Para que este método fosse reprodutível verificou-se ser necessária a medição da orientação da distribuição e do comprimento em pelo menos 2000 fibras individualmente o que torna este método moroso, fastidioso e dependente do operador. Para além destas desvantagens existia ainda o grande problema de a medição da orientação da distribuição e do comprimento para cada uma das fibras não ser precisa uma vez que a grande maioria das fibras não se apresentam rectilíneas. Daí a necessidade da imposição de algumas regras para que as medições fossem o mais próximo possível da realidade. Para colmatar estes problemas foram implementados métodos de análise de imagem directos que com base na mesma técnica (utilização de fibras coloridas) eliminaram o problema da subjectividade dos resultados causada pelo operador. Estes métodos permitiram medir só a anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras nas superfícies da folha de papel.

Os métodos indirectos alternativos que foram desenvolvidos para a quantificação da anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras nas folhas de papel incluem testes mecânicos, ópticos e de análise de imagem pelo método das intersecções. Estes últimos utilizam as contagens obtidas das intersecções entre as fibras coloridas inseridas no papel e linhas rectas de referência sobrepostas no papel. Estas contagens fornecem dados indirectos que são convertidos em funções de distribuição e posteriormente, por tratamento matemático, em anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras no papel.

Os métodos indirectos mais utilizados pela indústria papelreira são o teste de resistência à tracção e o método ultra-sónico muito embora os valores obtidos com estes métodos não sejam na realidade a anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras mas sim o resultado das tensões internas sobreposto com a orientação das fibras. Estes métodos são relativamente simples, rápidos e acessíveis à indústria do papel. Têm uma baixa resolução, e no caso do método ultra-sónico o parâmetro medido é a velocidade de propagação do som, que depende da densidade do papel, das tensões internas e da orientação das fibras.

Os métodos de determinação da anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras por dispersão da luz incluem os métodos baseados na dispersão e difusão da luz através da estrutura do papel, na difracção de Raios-X pelo papel e na difracção da luz laser por imagens representativas da superfície do papel. Como são métodos não destrutivos têm grande potencial para serem implementados na indústria do papel.

O método da dispersão da luz através da estrutura do papel (Lippke-Honeywell) é um método rápido possuindo uma resolução da ordem de 1 mm^2 (área de incidência do feixe luminoso na amostra). As maiores desvantagens deste método residem no facto de não poder ser utilizado para todas as gramagens dos papéis, estando limitado a uma gama reduzida de gramagens, e é bastante sensível às condições da superfície da folha de papel e ao posicionamento da fonte luminosa, da folha de papel e do sistema de detecção que deve ser estável e preciso.

Ainda dentro dos métodos baseados na dispersão da luz, o método da transmissão de ondas polarizadas no infravermelho longínquo através da estrutura do papel permite quantificar a gramagem, a anisotropia e ângulo de orientação preferencial da distribuição de fibras em vários materiais. As suas maiores vantagens residem no facto de ser um método não destrutivo, reproduzível, insensível à maior parte das cargas adicionadas ao papel e relativamente rápido. Possui uma resolução espacial que pode ir de 1 mm^2 até alguns centímetros quadrados e funciona bem para papéis com gramagens que podem ir de 10 gm^{-2} a 500 gm^{-2} .

Relativamente ao método da difracção de Raios-X verifica-se que este se revela bastante complexo, pelo menos no que diz respeito ao equipamento e ao seu preço, e é necessário um conhecimento prévio da distribuição do ângulo fibrilar nas camadas das células das fibras, para que o método possa ser aplicado com sucesso. Este método possibilita o conhecimento da distribuição da orientação da celulose cristalina em vez da distribuição de orientação das fibras.

O grande avanço na quantificação da anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras no papel durante os últimos anos tem sido efectuado em métodos de análise e processamento de imagem com a aquisição de imagens com detectores de estado sólido (CCD) ou com digitalizadores de imagem de alta resolução. Estes métodos são rápidos e mostram-se bem adaptados à obtenção de informação sobre a orientação e distribuição das fibras no papel com resultados precisos e bastante aceitáveis.

Finalmente, o novo método da difracção laser em réplicas e que está detalhadamente desenvolvido nesta tese, permite a quantificação da anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras à superfície do papel. É um método que pode ser aplicado não só ao papel mas a todas as redes fibrosas em geral. As grandes vantagens deste método são por um lado a sensibilidade e a precisão verificadas na obtenção de resultados, e por outro lado a reprodutibilidade desses mesmos resultados. Através dos resultados obtidos, apresentados em forma de mapa, é possível efectuar-se a identificação de variações locais na anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras.

Referências

- [1] Silvy, J., “Étude structurale des milieux fibreux” Thèse de Doctorat d’Etat, Université de Grenoble and Institut National Polytechnique de Grenoble, (1980).
- [2] Silvy, J., “La transformation conforme du pore equivalent, methode d’homogeneisation de la texture des milieux polyphasés”, *Recents Progres en Génie des Precedés*, ed. Bertrand, J., Gourdon, C., Riba, J.P., Diffusion: Lavoisier - Technique et Documentation – Paris, **7**, 3, 484-493 (1989).
- [3] Silvy, J., “The equivalent pore: a new representation of the structure of paper for the study of its physical and rheological properties”, *International Paper Physics Conference, CPPA-TAPPI*, 49-51, Canadá (1971).
- [4] Silvy, J., Caret, C., Belamaalem, B., Mahrous, M., “The three-dimensional structure of paper: methods of analysis and implications on his physical properties”, *Proceedings International Paper Physics Conference*, 91-95 (1995).
- [5] Niskanem, K.J., Sadowski, J.W., “Evaluation of some fibre orientation measurements”, *Journal of Pulp and Paper Science*, **15**, 6, J220-J224 (1989).
- [6] Dodson, C.T.J., Fekih, K., “The effect of fiber orientation on paper formation”, *Journal of Pulp and Paper Science*, **17**, 6, J203-J206 (1991).
- [7] Radvan, B., Dodson, C.T.J., Skold, “Detection and cause of the layers structure of paper in consolidation of the paper web”, F. Bolam, Ed. BPBMA, London, 189-215 (1966).
- [8] Corte, H., “The structure of paper”, In “The structure and physical properties of paper”, Edited by Rance, H.F., “*Handbook of paper science*”, 1^a ed. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, Vol. 2, cap. 9, 175-282 (1982).
- [9] Prusas, Z.C., “Laboratory study of the effects of fiber orientation on sheets anisotropy”, *Tappi*, **46**, 5, 325-330 (1963).
- [10] Silvy, J., Herve, Ph., “Formation de la feuille: Influence de la floculation, de la longueur et de la courbure des fibres sur la repartition orientationnelle des fibres et les propriétés physiques des papiers”, *Revue A.T.I.P.*, **36**, 6-7, 343-357 (1982).
- [11] Schaffnit, C., Silvy, J., Dodson, C.T.J., “Orientation density distributions of fibres in paper”, *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, **3**, 121-128 (1992).

- [12] Schroder, A., Silvy, J., Butel, M., Drouin, B., Gagnon, R., “Structure millimétrique du papier: mesure et perspective”, *Proceedings Conference Technologique Estivale CPPA*, Canada, 59-64 (1994).
- [13] Drouin, B., Gagnon, R., Schroder, A., Butel, M., Silvy, J., “L’orientation des fibres et les propriétés mécaniques du papier: méthodes de contrôle de l’anisotropie de la feuille”, *Revue A.T.I.P.*, **49**, 2, 66-72 (1995).
- [14] Drouin, B., Gagnon, R., “Optical measurement of paper fiber orientation”, *Optical Engineering*, **32**, 9, 2138-2142 (1993).
- [15] Bergeron, M., Bernard, P., Boullay R., Drouin, B., Gagnon, R., “The submillimetre laser: industrial applications”, *Canadian Journal of Physics*, **66**, 896-902 (1988).
- [16] Koran, Z., Bussieres, D., Prud’homme, R., “A study on orientation and curl”, *Tappi*, **65**, 8, 88-91 (1982).
- [17] Varpula, T., “Microwave fiber orientation sensor”, *Proceedings 28th European Microwave Conference Amsterdam*, 455-460 (1998).
- [18] Prud’homme, R., Hien, N.V., Noah, J., Marchessault, H., “Determination of fiber orientation of cellulosic samples by x-ray diffraction”, *Journal of Applied Polymer Science*, **19**, 2609-2620 (1975).
- [19] Kallmes, O.J., “Technique for determining the fiber orientation distribution throughout the thickness of a sheet”, *Tappi*, **52**, 3, 482-485 (1969).
- [20] Silvy, J., Lebreton, P., Butel, M., “Influence de la difference des vitesses du jet de pate et de la toile de la machine sur les caracteristiques physiques du papier”, *Doc. FCI. École Française de Papeterie , IRFIP, SE*, 92, 46, 1-29 (1976).
- [21] Hess, T.R., Brodeur, P.H., “Effects of wet straining and drying on fibre orientation and elastic stiffness orientation”, *Journal of Pulp and Paper Science*, **22**, 5, J160-J164 (1996).
- [22] Danielsen, R., Steenberg, B., “Quantitative determination of fiber orientation in paper”, *Svensk Papperstidning*, **50**, 13, 301-305 (1947).
- [23] Forgacs, O.L., Strelis, I., “The measurement of the quantity and orientation of chemical pulp fibres in the surfaces of newsprint”, *Pulp and Paper Magazine of Canada*, January (1963).
- [24] Koran, Z., Silvy, J., Prud’homme, R., “Network structure and fiber orientation in paper”, *Tappi Journal*, **69**, 5, 126-128 (1986).
- [25] Vinatier, J., Silvy, J., “Étude statistique de fonctions de repartition des fibres dans des materiaux du type papier et tissu non tissé”, *Revue A.T.I.P.*, **29**, 133 (1975).
- [26] Mercer, P.G., “On-line instrumentation for wet-end control”, *Appita*, **41**, 4, 308-312 (1988).
- [27] Pereira, M.J.T., Salvado, L.R., Fiadeiro, P.T., Silvy, J., “3-D characterisation of nonwoven fabrics by means of an optical system”, *Proceedings of Fiber Society – Spring 2000 Joint Conference*, 155-158 (2000).
- [28] Sisson, W.A., Clark, G.L., *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.* 5, 296-300 (1933).

- [29] Ruck, H., Krassig, H., “The determination of fiber orientation in paper”, *Pulp and Paper Magazine of Canada*, 183-190, Junho (1958).
- [30] Page, D.H., “A method for determining the fibrillar angle in wood tracheids”, *Journal of Microscopy*, **2**, 90, 137-143 (1969).
- [31] Page, D.H., El-Hosseiny, F., Winler, K., Bain, R., “The mechanical properties of single wood-pulp fibres: Part I: A new approach” *Pulp and Paper Magazine of Canada*, **8**, 73, 72-77 (1972).
- [32] Drouin, B., Gagnon, R., Schroder, M., Silvy, J., Butel, A., “High resolution fiber orientation and weight measurement”, *Proceedings International Paper Physics Conference*, 87-90 (1995).
- [33] Drouin, B., Gagnon, Cheam, C., Silvy, J., “Évaluation de la formation de la feuille de papier: une nouvelle approche”, *Proceedings CR. 11èmes Journées Nationales sur les Composites*, Vol. II, 647-654 (1998).
- [34] Bernard, P., Charlebois, A., “Comparison of basis weight, fiber orientation and alignment angle distributions for different spatial resolutions”, *Proceedings International Paper Physics Conference*, 71-79 (1991).
- [35] Bernard, P., Charlebois, A., “Probing fiber orientation distribution via ellipsometric measurements in the far infrared”, *Tappi Proceedings International Paper Physics Conference*, 81-87 (1991).
- [36] Lindblad, G., “Ultrasonic measurement – a reliable method for the quality control of paper”, *Hanbbook da Lorentzen&Wettr*, 14-26 (1996).
- [37] “NOI Infrared Surface Anisotropy Instrument”, National Optics Institut of Canada, *Pulp & Paper International*, March, (1994).
- [38] Fine, S.S., “Sonic Sheet Testing: it use in the paper industry”, *Tappi Journal*, 169, July (1990).
- [39] Tiuri, M., Liimatainen, P., “A microwave method for measurement of fiber orientation in paper”, *Journal of Microwaves Power*, **10**, 2, 141-145 (1975).
- [40] Olofsson, K., Molin, N.E., Kyosti, A., “A local method to detect anisotropy and local variations in paper”, *Tappi Journal*, 195-200, March (1991).
- [41] Fallstron, K.E., Gustavsson, H., Molin, N.E., Wahlin, A., *Experimental Mechanics*, **11**, 8, 357 (1971).
- [42] Linnet, L.M., Clarke, S.J., Byatt, A., Kleiner, T., “A comparison of sensor and image processing techniques for the assessment of paper quality”, *Proceedings QCAV 97- International Conference on Quality Control by Artificial Vision*, 237-241 (1997).
- [43] Mignot, L., “Effect of micro-scale fiber orientation on macro-sacle paper properties: development of fiber orientation measurement methods by image analysis”, *Diplome de Recherche Technologique, Spécialité: Génie des Procédés*, (1998).

- [44] Mark, R., “Structure and structural anisotropy”, Edited by Mark, R.E., In “*Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard*”, New York: Marcel Dekker, **2**, 283-377 (1984).
- [45] Rudstrom, L., Sjolín, U., “A method for determining fiber orientation in paper by using laser light”, *Svenske Papperstidning*, **73**, 5, 117-121 (1970).
- [46] Sadowski, J.W., “Measurement of fibre orientation in paper by optical Fourier transform”, *Paperi Já Puu - Paper and Timber*, **9**, 588-595 (1979).
- [47] Rhiannon, J., “Developments in process control are fundamentally changing the way paper is made and creating new opportunities to boost quality and efficiency”, *Pulp and Paper International*, Online Edition (www.pponline.com), August (1999).
- [48] Dodson, C.T.J., Schaffnit, C., “Flocculation and orientation effects on paper-formation statistics”, *Tappi Journal*, 167-171, January (1992).
- [49] Scharcanski, J., Dodson, C.T.J., “local spatial anisotropy and its variability”, *Journal of Pulp and Paper Science*, **25**, 11, 393-397 (1999).
- [50] Borch, J., “Optical and appearance properties”, Edited by Mark, R.E., In “*Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard*”, New York: Marcel Dekker, **2**, 1-54 (1984).
- [51] McGee, S.H., McCullough, R.L., “Characterization of fiber orientation in short-fiber composites”, *Journal of Applied Physics*, **55**, 5, 1394-1403 (1984).
- [52] Pipes, R.B., McCullough, R.L., Taggart, D.G., “Behaviour of discontinuous fiber composites: fiber orientation”, *Polymer Composites*, **3**, 1, 34-39 (1982).
- [53] Darlington, M.W., McGinley, P.L., Smith, G.R., “Structure and anisotropy of stiffness in glass fiber-reinforced thermoplastics”, *Journal of Materials Science*, **11**, 877-886 (1976).
- [54] Smith, R.C., Marsh, J.S., “Diffraction patterns of simple apertures”, *Journal of the Optical Society of America*, **64**, 6, 798-802 (1974).
- [55] Niskanen, K.J., “Anisotropy of laser paper”, *Paperi Já Puu – Paper and Timber*, **5**, 75, 321-328 (1993).
- [56] Niskanen, K.J., “Distribution of fibre orientations in paper” In *Fundamentals of Papermaking* , Baker C.F. and Punton, V.W., eds. Mech. Eng Publ. Ltd., London 275-308 (1989).
- [57] Thorpe, J.L., “Exploring fiber orientation within copy paper”, *Tappi Proceedings International Paper Physics Conference*, 447-458 (1999).
- [58] Lim, Y.W., Sarko, A., Marchessault, R.H., “Light scattering by cellulose II. Oriented condenser paper”, *Tappi*, **12**, 53, 2314-2319 (1970).
- [59] “Surface Measurement of Fiber Orientation Anisotropy”, *Publication of Institut National D’Optique*, Canada (Quebec).
- [60] “AccuRay Smart Fiber Orientation Sensor”, ABB Industrial Systems, *Pulp and Paper International*, vol. 41, n° 8, August (1999).

Capítulo 2

Sistema para Processamento Digital de Imagens

2.1 Introdução

A percepção do homem relativamente à informação que o rodeia resulta na sua maior parte do seu sentido visual. Durante muito tempo as imagens só puderam ser registadas recorrendo à fotografia. Actualmente devido ao rápido progresso do vídeo e da tecnologia computacional, os computadores pessoais tornaram-se suficientemente poderosos para processarem dados de imagens, sendo amplamente utilizados no processamento de imagem. O processamento digital de imagem está baseado na conversão de uma imagem analógica contínua numa imagem digital discreta.

As técnicas de processamento digital de imagem são de uma forma geral aplicadas a imagens ou a dados de imagens para:

- Modificar uma imagem e melhorar a sua aparência ou para fazer sobressair algum aspecto da informação nela contida;
- Caracterizar, classificar, identificar e medir os elementos e componentes de uma imagem;
- Combinar porções de imagens ou reorganizar elementos de uma imagem;
- Recuperar ou reconstruir a informação contida numa imagem.

As técnicas usadas no processamento de imagem podem ser aplicadas aos dados dessa imagem, mesmo que eles não se encontrem numa forma visível. No entanto, a manipulação de dados visíveis é provavelmente a aplicação mais utilizada em processamento de imagem.

A aplicação de uma transformação a uma dada imagem nem sempre é feita com a finalidade do resultado ter a aparência de uma outra imagem, a qual pode mesmo não ser agradável de se observar. A estética não é o único critério que avalia a efectividade ou não da transformação aplicada. Se a transformação for implementada para se obter informação adicional e/ou detalhes que não sejam

visíveis na imagem original, o resultado pode ser considerado um sucesso mesmo que ele, tal como já foi referido, não seja agradável de se observar. A finalidade dos procedimentos é extrair toda a informação de uma imagem, numa forma que possa ser processada por computador. Esta área é referida como processamento digital de imagem em vez de processamento de imagem. Assim sendo, o processamento digital de imagem engloba a aquisição, discretização, armazenamento e interpretação dos dados pelo computador sob a forma de uma imagem digital.

Podem ser desenvolvidas e implementadas várias transformações e algoritmos de processamento os quais podem ser aplicados individualmente a uma imagem ou em conjugação com outras funções. De notar que, a aplicação dessas transformações e algoritmos não é em geral comutativa. As transformações podem ser utilizadas como se de uma receita de cozinha se tratasse, mesmo sem se entender os seus fundamentos matemáticos. Logicamente que os resultados obtidos serão de maior confiança se a matemática associada a cada uma das transformações for completamente assimilada.

O número de novas aplicações bem como os grupos interessados nessas aplicações está continuamente a aumentar. Provavelmente não existirá, actualmente, um único ramo da ciência onde não se empregue de algum modo o processamento digital de imagem. Exemplos disso são os diagnósticos de Raios-X, diagnósticos de plasma, diagnósticos ópticos, fotografias de alta velocidade, inspecção radiográfica, holografia acústica, inspecção de controlo de qualidade, entre outros.

Este capítulo é dedicado à apresentação do sistema desenvolvido para processamento digital de imagem no laboratório de Investigação em Interferometria e Difracção laser, do Departamento de Física da Universidade da Beira Interior. A ideia foi disponibilizar e utilizar o sistema como suporte à investigação desenvolvida no referido laboratório. Algumas técnicas específicas, bem como as transformações e algoritmos implementados especialmente para aplicações particulares podem facilmente ser incluídos.

A secção 2.2 apresenta e descreve os fundamentos da digitalização da imagem. Inclui uma imagem modelo e uma definição intuitiva da amostragem e quantificação da imagem. Os elementos principais de um sistema de processamento digital de imagem genérico estão descritos na secção 2.3 e algumas considerações de *hardware* e *software* do sistema são apresentadas na secção 2.4. A secção 2.5 inclui um breve resumo deste capítulo.

2.2 Fundamentos da imagem digital

O termo imagem monocromática ou simplesmente imagem, refere-se à função bidimensional da intensidade da luz $f(x, y)$, onde x e y representam as coordenadas espaciais em qualquer ponto (x, y) , sendo o valor de f proporcional ao brilho ou nível de cinzento da imagem nesse ponto. No caso de se pretender observar uma imagem em perspectiva, o terceiro eixo representará o brilho.

Uma imagem digital é uma imagem $f(x, y)$ que foi discretizada tanto em coordenadas espaciais como em brilho. Pode ser considerada como uma matriz onde os índices das linhas e das colunas identificam um ponto na imagem e onde o valor do elemento matricial correspondente identifica o nível de cinzento para esse ponto. Os elementos de uma tal matriz digital são chamados elementos da imagem, elementos da figura ou *pixels*, sendo este último o mais utilizado.

2.2.1 O Modelo da Imagem

Tal como foi anteriormente definido, o termo imagem refere-se a uma função bidimensional da intensidade luminosa denotada por $f(x, y)$. Como a luz é uma forma de energia, a função $f(x, y)$ tem de ser finita, não podendo nunca ser nula, isto é,

$$0 < f(x, y) < +\infty \quad (2-1)$$

As imagens que se observam todos os dias consistem de luz reflectida a partir dos objectos. De um modo geral $f(x, y)$ pode ser considerada como sendo caracterizada por duas componentes, uma a quantidade de luz incidente na cena (para que ela possa ser observada) e outra a quantidade de luz reflectida pelos objectos da referida cena. Essas duas componentes são denominadas por iluminação $i(x, y)$ e reflectância $r(x, y)$ [1], e da sua combinação obtém-se a função $f(x, y)$, isto é,

$$f(x, y) = i(x, y) \cdot r(x, y) \quad (2-2)$$

onde

$$0 < i(x, y) < +\infty \quad (2-3)$$

e

$$0 < r(x, y) < 1 \quad (2-4)$$

A equação 2-4 indica o facto de a reflectância estar limitada entre a absorção total (0) e reflectância total (1). A natureza de $i(x, y)$ é determinada pela fonte de luz, enquanto que a natureza de $r(x, y)$ é determinada pelas características do objecto na cena.

Os valores apresentados nas equações 2-3 e 2-4 são limites teóricos. A intensidade f da imagem monocromática resultante para a posição de coordenadas (x, y) é designada por nível de cinzento l da imagem nesse ponto. Das equações 2-2, 2-3 e 2-4, resulta que l tem de estar compreendido entre um valor mínimo L_{min} e um valor máximo L_{max} , isto é,

$$L_{min} \leq l \leq L_{max} \quad (2-5)$$

A única restrição para L_{min} é que seja positivo e para L_{max} é que seja finito. Na prática, $L_{min} = i_{min} r_{min}$ e $L_{max} = i_{max} r_{max}$. O intervalo $[L_{min}, L_{max}]$ é chamado de escala de níveis de cinzento e é prática comum apresentar este intervalo sob a forma $[0, L]$, onde $l = 0$ é considerado preto, e $l = L$ é considerado branco nessa escala. Todos os valores intermédios são tonalidades de cinzento variando continuamente entre o preto e o branco.

Para completar este modelo de imagem deve ser incluído o processo de degradação da imagem [2]. Este processo é modelado por um operador ou sistema H , que em conjunto com um termo aditivo de ruído $\eta(x, y)$ que operará na imagem inicial, $f(x, y)$, para produzir uma imagem degradada de saída, $g(x, y)$, com a relação entrada-saída dada pela expressão

$$g(x, y) = H f(x, y) + \eta(x, y) \quad (2- 6)$$

onde o operador H pode ser linear, não linear, variante ou invariante no espaço.

2.2.2 Amostragem e Quantificação

Uma função imagem $f(x, y)$ tem de ser digitalizada tanto espacialmente como em intensidade, para ser processada num computador. Nesta tese, a digitalização das coordenadas espaciais (x, y) será referida como amostragem da imagem, enquanto a digitalização da intensidade será referida como quantificação do nível de cinzento.

Uma imagem analógica contínua $f(x, y)$ pode ser considerada como sendo constituída por um conjunto de amostras igualmente espaçadas dispostas sob a forma de uma matriz de $N \times N$ tal como se apresenta na equação 2-7, onde cada elemento de linha é uma quantidade discreta:

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0, 0) & f(0, 1) & \cdots & f(0, N-1) \\ f(1, 0) & f(1, 1) & \cdots & f(1, N-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(N-1, 0) & f(N-1, 1) & \cdots & f(N-1, N-1) \end{bmatrix} \quad (2- 7)$$

$f(x, y)$ representa o que é usualmente chamada de imagem digital, enquanto cada elemento da linha é referido como elemento da imagem, elemento da figura ou *pixel* tal como indicado no início da secção 2.2. Os termos imagem e *pixel* serão usados nesta tese para definir imagem digital e elementos de imagem. A digitalização de uma imagem não está limitada a matrizes quadradas, contudo no decorrer desta tese os assuntos serão sempre visualizados como matrizes quadradas.

O processo de digitalização anterior requer que se tome uma decisão quanto ao valor de N , bem como quanto ao número de níveis de cinzento discretos permitidos para cada *pixel*. É prática comum em processamento de imagem que essas duas quantidades sejam potências inteiras de 2, isto é,

$$N = 2^n \quad (2- 8)$$

e

$$G = 2^m \quad (2- 9)$$

onde G representa o número de níveis de cinzentos e N o número de *pixels* por linha e coluna existentes na matriz da imagem digital. Assumindo que os níveis discretos na escala de cinzentos são

igualmente espaçados entre 0 e L e utilizando as equações 2-8 e 2-9 o número de bits necessário para armazenar uma imagem digitalizada é dado por

$$n_{bits} = N \times N \times m \quad (2-10)$$

Por exemplo a figura 2-1 apresenta uma imagem digital de 512×512 *pixels* com 256 níveis de cinzento ($m = 8$). Esta imagem requer 2.097.152 bits de armazenamento correspondendo a 256 kbytes.

Uma vez que a equação 2-7 é uma aproximação a uma imagem contínua, uma questão que se impõe colocar neste momento é quantas amostras e níveis de cinzento são necessários para que a aproximação seja uma boa aproximação? Como a resolução, isto é, o grau de discernimento dos detalhes de uma imagem, está fortemente dependente de N e de m , quanto maiores forem estes dois parâmetros, maior será a semelhança entre a imagem digitalizada e a imagem original. Contudo da equação 2-10 também se conclui que o armazenamento e conseqüentemente os requisitos do processamento aumentam rapidamente com N e m . Se por um lado a situação ideal é trabalhar-se com o maior número de amostras e de níveis de cinzento possíveis, por outro lado quanto maior for esse número maior é o espaço necessário para o armazenamento da imagem digitalizada.



Figura 2- 1 Imagem digital de 512×512 com 256 níveis de cinzento.

O número de amostras e níveis de cinzento necessários para se obter uma reprodução agradável de uma imagem original depende em grande parte dela própria. Como base de comparação [2,3], os requisitos necessários para se obter uma qualidade comparável às imagens monocromáticas da televisão, dentro de uma grande banda de tipos de imagens, são da ordem de 512×512 *pixels*, com 128 níveis de cinzentos ($m = 7$). Em geral, um sistema mínimo para executar trabalhos normais de processamento de imagem deve poder apresentar imagens de 256×256 *pixels* com 64 níveis de cinzentos ($m = 6$).

2.3 Elementos de um sistema de processamento digital de imagem

Os elementos de um sistema necessários para executar operações de processamento de imagem estão apresentados na figura 2-2. Este tipo de sistema executa a aquisição, o armazenamento, o processamento e a apresentação da imagem num monitor. O modo de funcionamento de cada elemento da figura 2-2 será explicado nas secções que se seguem.

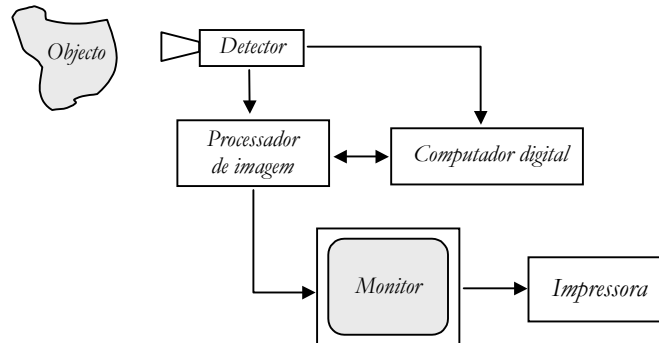


Figura 2- 2 Elementos de um sistema de processamento digital de sinal.

2.3.1 Detectores de Imagem

A detecção e registo de imagem estão divididas em duas grandes tecnologias: a fotoquímica e a fotoelétrica [4]. A tecnologia fotoquímica recorre a filmes fotográficos enquanto que a tecnologia fotoelétrica recorre a câmaras de vídeo e a monitores de televisão. As duas técnicas referidas são amplamente utilizadas em processamento digital de imagem com as vantagens e desvantagens associadas a ambas. Os métodos fotoquímicos possuem a vantagem de combinar a detecção e o registo da imagem numa entidade única e compacta que é o filme fotográfico. Por seu lado, os sistemas fotoelétricos requerem a separação do processo de detecção do processo de registo da imagem. Contudo, os sistemas fotoelétricos interpretam e convertem as imagens num sinal eléctrico de vídeo o qual é ideal para entrada num processador de imagem.

A detecção e registo da imagem com o recurso a filmes fotográficos está fundamentada nas propriedades dos sais de prata constituintes do filme, que quando expostos à luz alteram as suas propriedades químicas. A acção de agentes redutores, conhecidos por reveladores, resulta na precipitação e deposição da prata livre. A massa de prata depositada é linearmente proporcional ao logaritmo da exposição total E [5] definida por:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt \quad (2-11)$$

onde $I(t)$ representa a intensidade luminosa incidente no filme e t o tempo de incidência.

Para estes filmes existe uma região onde toda a prata disponível é depositada que é a região de saturação, e uma região resultante da deposição de uma pequena quantidade de prata que acontece mesmo na ausência de qualquer exposição à luz que é a região de obscuridade. Este comportamento do filme é apresentado normalmente sob a forma de uma curva $D - \log E$, onde D é a densidade óptica que é definida através de

$$D = \log_{10} \left(\frac{I_i}{I_{tr}} \right) \quad (2-12)$$

sendo I_i a intensidade da luz incidente que ilumina o filme fotográfico e I_{tr} a intensidade da luz transmitida através do filme ou reflectida por ele. Na figura 2-3 pode observar-se uma curva típica $D - \log E$. Este tipo de curva é frequentemente denominada por curva característica do filme [5], ou curva $H - D$.

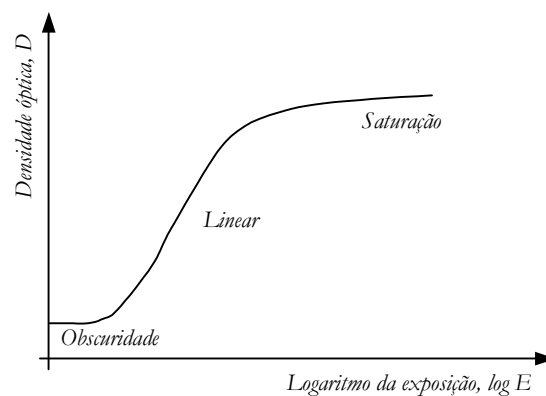


Figura 2- 3 Curva $D - \log E$ típica para um filme fotográfico.

Hunter e Driffield [6], mostraram que a densidade óptica D medida a partir da equação 2-12, para a região linear da curva da figura 2-3, pode ser expressa através de

$$D = \gamma \log_{10} E - D_0 \quad (2-13)$$

onde γ é o declive da recta tangente à região linear, referido como gama do filme e D_0 é a ordenada na origem (*offset*). Se for assumido que a exposição é constante durante um intervalo de tempo unitário, então da equação 2-11 resulta que $E = I_0$ e por substituição da equação 2-13 na equação 2-12 obtém-se:

$$I_{tr} = I_i \exp(-\gamma \log_{10} I_0 + D_0) = CI_0^{-\gamma} \quad (2-14)$$

A equação 2-14 é a equação básica do comportamento do filme como instrumento de registo das intensidades da imagem para intensidades luminosas constantes. Deve notar-se no entanto que de um modo geral a intensidade I_{tr} observada não é linear e que só no caso de um filme positivo de declive unitário é que se encontra uma relação linear, entre a intensidade incidente e a intensidade transmitida através do filme. Assim, o filme é um elemento não linear no processo de detecção e registo de imagens.

Relativamente aos sistemas fotoeléctricos de detecção de imagem estes dividem-se em três subsistemas principais: a parte óptica que forma a imagem, a superfície fotoactiva que detecta a imagem e a parte electrónica de varrimento para “ler” a imagem formada na superfície fotoactiva [7]. O equipamento

mais utilizado neste tipo de sistemas são câmaras de tubo de raios catódicos e detectores de matriz de estado sólido fotosensíveis. A entrada ou estímulo variável de um detector de imagem fotoelétrico é energia radiante (Raios-X, ultravioleta, visível, infravermelho, etc.), sendo a saída ou resposta ao estímulo de entrada uma quantidade eléctrica, isto é, corrente ou tensão. A saída é de corrente no caso de um detector de varrimento de feixe de electrões e é de tensão no caso de um detector de estado sólido. Como o mais vulgar é existir uma resposta para um largo domínio de variáveis de entrada e saída, é mais conveniente representar-se graficamente o logaritmo da variável de saída em função do logaritmo da variável de entrada.

Tal como no caso dos filmes fotográficos, existe uma resposta de saturação para intensidades elevadas e uma resposta limite para intensidades muito baixas, conhecida como corrente de escuro (resposta do detector quando não existe radiação). Existe também uma região linear na qual o logaritmo da resposta é proporcional ao logaritmo do estímulo de entrada. O declive desta região, do mesmo modo que para os filmes fotográficos, é denominado como gama do detector.

Nas câmaras de tubo de raios catódicos [1,4] a imagem é focada directamente na superfície de um tubo fotosensível cuja resposta é proporcional ao padrão da luz incidente. O princípio de funcionamento destas câmaras está baseado no princípio da fotocondutividade. Um feixe de electrões varre a superfície posterior do alvo fotocondutivo e por neutralização de carga cria uma diferença de potencial, a qual produz um sinal de corrente proporcional ao brilho do padrão. Desta forma, o comportamento da região linear pode ser expresso sob a forma de uma equação, similar à equação 2-13 para os filmes fotográficos,

$$\log i_b = \gamma \log I_0 - \xi \quad (2-15)$$

onde i_b é a corrente do feixe de varrimento, I_0 é a intensidade da iluminação incidente, γ é o declive da parte linear e ξ é o offset.

Do mesmo modo que para os filmes fotográficos, obtém-se uma relação para as características de transferência entre a intensidade da luz de entrada e a corrente medida do feixe de electrões:

$$i_b = K I_0^\gamma \quad (2-16)$$

Existem duas grandes diferenças entre as respostas apresentadas pelos filmes fotográficos e pelos detectores fotoelétricos, as quais podem ser deduzidas das equações 2-14 e 2-16. Os detectores fotoelétricos produzem uma resposta proporcional à fracção de luz incidente, enquanto que os filmes fotográficos têm um comportamento exponencial negativo. Para além disso, existem muitos sistemas fotoelétricos para os quais as características de entrada-saída são lineares, isto é $\gamma = 1$, numa vasta extensão e para a região não linear os desvios à linearidade são relativamente pequenos, o que não acontece no caso dos filmes fotográficos.

No que diz respeito aos detectores de estado sólido [8-11], eles são compostos de elementos de silício discretos possuindo um sinal de saída proporcional à intensidade da luz incidente. Os detectores de

matriz de estado sólido estão organizados em duas arquitecturas principais: os sensores de varrimento de linha e os sensores de área. Os sensores de varrimento de linha consistem numa linha de elementos de imagem (células) produzindo uma imagem bidimensional através de um movimento relativo entre a cena e o detector, enquanto que os sensores de área são compostos por uma matriz de elementos de imagem capazes de capturar uma imagem da mesma forma que um tubo de raios catódicos. Um sensor de área de elevada resolução tem tipicamente 576 linhas de 768 elementos com dimensões $8.3 \times 8.6 \mu\text{m}$ o que perfaz uma área de $4.7 \times 6.4 \text{ mm}^2$.

Os detectores de estado sólido são também chamados dispositivos de carga acoplada, *CCD* (*Charge Coupled Devices*), dispositivos de injeção de carga, *CID* (*Charge Injection Devices*) e dispositivos de transferência de carga, *CTD* (*Charge Transfer Devices*),

Os tubos de raios catódicos e os sensores de área são normalmente comercializados sob a forma de câmaras de vídeo sendo a digitalização da imagem realizada ligando-se o sinal de saída vídeo da câmara ao módulo de aquisição do processador de imagem. Existem no entanto alguns detectores que possuem a capacidade de realizar a digitalização da imagem eles próprios sendo o sinal de saída digital fornecido directamente a um computador digital.

2.3.2 Processadores de Imagem

O processador digital de imagem é a parte fundamental de qualquer sistema de processamento de imagem. Um processador de imagem consiste num conjunto de módulos de *hardware* que realizam quatro funções de imagem básicas: a aquisição, o armazenamento, a apresentação e o processamento rápido [1-3,12]. A aquisição é realizada pelo módulo de aquisição, onde a componente de entrada vídeo é, em geral, um sinal de vídeo analógico de um detector. Em primeiro lugar o sinal de vídeo é processado e a fonte vídeo é sincronizada com o módulo de uma forma adequada. Em seguida os sinais são digitalizados, tanto espacialmente como em intensidade (brilho) e armazenados após um pré-processamento no módulo de armazenamento.

Os processadores de imagem que processam só sinais de vídeo monocromáticos (preto e branco) possuem uma entrada de vídeo múltipla. Essa entrada permite que o módulo de aquisição esteja ligado a um determinado número de sinais de vídeo. De entre todos os sinais de vídeo que entram no módulo de aquisição podem-se seleccionar os sinais desejados via *software*. Antes de o sinal de vídeo analógico ser digitalizado, passa por um amplificador vídeo com ganho e *offset* programáveis, que faz com que o sinal de entrada de vídeo seja mais adaptado à variação de entrada do conversor analógico-digital, *ADC* (*Analogue-Digital Converter*).

Os módulos de aquisição de cor podem digitalizar imagens de cor das fontes de vídeo *RGB* as quais fornecem os sinais de vídeo vermelho, verde e azul separadamente. Sinais de vídeo composto, para os

quais a luminância e a informação de cor estão compostos num único sinal não podem ser adquiridos. Nesse caso, é necessário usar um decodificador que divida o sinal de vídeo nas suas componentes *R*, *G* e *B*, o que já acontece em alguns processadores de imagem. Esses equipamentos podem também decodificar sinais de vídeo *Y/C* de acordo com o padrão de vídeo *S-VHS*. Em aplicações científicas, em vez de sinais *RGB*, podem ser capturados sinais de vídeo de várias câmaras monocromáticas que estejam sincronizadas entre si. Desta forma imagens de um multicanal podem ser adquiridas e processadas simultaneamente. Além disso, do conteúdo da imagem fazem parte os sinais de sincronização que marcam o início de uma imagem (sincronização vertical) e o início das linhas dessa imagem (sincronização horizontal). Estes sinais são extraídos da entrada vídeo por um dispositivo de sincronização e utilizados para sincronizar os módulos de armazenamento e amostragem.

Os processadores mais recentes podem processar sinais de vídeo tanto de acordo com a norma europeia *CCIR (PAL)* como segundo a norma americana *RS-170 (NTSC)* [1-3] com 25 e 30 imagens por segundo, respectivamente. O módulo de aquisição é por isso normalmente denominado como placa de aquisição e armazenamento (*frame grabber*) porque pode parar instantaneamente uma única imagem.

De um modo geral, o sinal de vídeo é digitalizado com uma resolução de 8 bits, isto é, 256 níveis de cinzento à razão de 10 milhões de *pixels* por segundo (10 MHz). A imagem digitalizada resultante contém 512×512 ou 480×512 *pixels* nos formatos europeu e americano, respectivamente. Os *frame grabbers* mais recentes são muito mais flexíveis permitindo que o número de linhas e colunas bem como a taxa do relógio de *pixel* possam ser programados numa banda extensa.

As câmaras de vídeo comuns trabalham no modo interlaçado, isto é, a imagem global é composta de duas meias imagens que contêm uma as linhas pares e outra as linhas ímpares. Essas meias imagens, também chamadas campos, são varridas uma a seguir à outra. Assim, os dois campos são iluminados um a seguir outro, com um espaçamento de metade de um intervalo de tempo entre duas imagens sucessivas.

Em relação ao armazenamento, a imagem digitalizada é escrita num módulo de memória interna, normalmente chamado *frame buffer*, através de uma tabela de entrada, uma *ILUT (Input Look-Up Table)* [3]. As tabelas de entrada (*ILUT*) permitem uma implementação rápida de operações pontuais antes de os *pixels* serem armazenados no *frame buffer*. A *ILUT* pode ser acedida externamente através de um computador digital para fins de programação.

Todos os processadores de imagem contêm um *frame buffer* que pode armazenar *pixels* quantificados no mínimo com 8 bits de informação. Normalmente o *frame buffer* pode armazenar entre 2 e 16 imagens de 512×512 *pixels* de máxima resolução, o que corresponde a uma capacidade de memória entre 0.5 e 4 Mbytes. Os *frame buffers* apresentam uma estrutura interna complexa que permite que as imagens digitalizadas possam ser escritas e lidas em simultâneo. As novas arquitecturas de *frame buffers* permitem

a escrita (digitalização) e a leitura (visualização) de *pixels* independente uma da outra, na memória e a partir da memória, respectivamente.

Além do acesso contínuo e sequencial ao *frame buffer*, por exemplo para visualização da imagem, um computador digital pode aceder aleatoriamente à memória do *frame buffer* para transferência de uma imagem entre o processador de imagem e o computador e vice-versa. O *frame buffer* pode ser endereçado a taxas de TV através de um módulo de amostragem. Este módulo converte a imagem digital em sinal vídeo analógico podendo a imagem ser observada num monitor de TV. Geralmente este módulo de amostragem tem três canais vídeo de saída (um para cada uma das cores primárias, vermelho, verde, e azul). Antes da conversão do sinal digital para um sinal analógico, através de um conversor digital-analógico *DAC* (*Digital-Analog Converter*), o sinal passa por uma tabela de saída, uma *OLUT* (*Output Look-Up Table*) para operações de homogeneização e transformação de *pixels*. Cada canal de cor tem a sua própria *OLUT*. Programando de forma diferente cada uma das *OLUT* é possível obterem-se imagens em pseudo-cor.

O processamento de imagem continua a ter de ser executado num computador digital. Isto inclui também a transferência de dados da imagem do *frame buffer* para o computador e do computador para o *frame buffer*. Devido ao tempo despendido nesta transferência de informação e à velocidade de processamento do computador, as operações de processamento de imagem não podem ser executadas em tempo real. Para se contornar este problema a solução é integrar-se no processador de imagem um módulo de processamento. Este módulo inclui hardware dedicado que permite que as operações de processamento de imagem comuns sejam consideravelmente aceleradas. Existem duas possibilidades para tal:

- a inclusão no *frame buffer* de elementos de processamento especiais dedicados a um único tipo de operação;
- ou a integração de um processador genérico rápido.

A inclusão de elementos de processamento dedicados têm a vantagem de fazer com que certas operações possam ser executadas em tempo real [2,12]. No entanto, uma tal solução não permite grande flexibilidade e não é conveniente na implementação algoritmos complexos. Relativamente aos processadores programáveis estes são mais eficientes para algoritmos complexos em etapas posteriores de processamento de imagem. O mais normal é a integração no módulo de processamento de uma unidade aritmética-lógica, *ALU* (*Aritmetic-Logic Unit*) a qual permite a realização de operações aritméticas e lógicas em tempo real.

2.3.3 Computadores digitais

Tal como já foi mencionado, um processador de imagem pode ser equipado com capacidades de processamento internas sendo no entanto o nível deste processamento pouco sofisticado. Deste modo

normalmente os processadores de imagem estão interligados com um computador digital, o qual fornece versatilidade bem como facilidade de programação.

Os sistemas computacionais usados para processamento de imagem vão desde os microprocessadores até sofisticados sistemas capazes de executarem funções computacionais intensivas em grandes matrizes de imagens. Os principais parâmetros que influenciam a estrutura de um computador para processamento de imagem são as aplicações pretendidas e os dados requeridos. Para aplicações dedicadas que não necessitem de grandes recursos, um micro ou um minicomputador bem equipado será o suficiente. Mas se a aplicação envolve o desenvolvimento de programas extensivos ou se ela é caracterizada por dados significativos, uma estação de trabalho será o ideal. Neste caso, um computador com capacidades de endereçamento de memória virtual tem muitas vantagens. O endereçamento virtual torna o armazenamento periférico disponível ao utilizador tal como se fosse a memória principal. Esta possibilidade, apenas disponível em sistemas *UNIX*, é de crucial importância uma vez que as imagens digitais utilizam grandes recursos de memória durante o processamento.

A alternativa ao endereçamento de memória virtual é um conjunto de rotinas complexas cuja única função é trocar os segmentos da imagem dentro e fora do armazenamento periférico durante o processamento. A desvantagem desta alternativa é que o tempo de processamento aumenta consideravelmente em consequência da troca constante dos segmentos das imagens.

2.3.4 Dispositivos de armazenamento

Uma imagem digital normal consistindo de 512×512 *pixels*, cada um dos quais quantificado em 8 bits, requer 0,25 Mbytes de memória. Assim, um dos aspectos mais importantes a se ter em conta no desenho de um sistema de processamento de imagem genérico é a capacidade de armazenamento. Os meios mais utilizados para o armazenamento da informação processada são discos magnéticos, fitas magnéticas e discos ópticos. Os discos magnéticos têm uma capacidade de memória de 60 Gbytes e permitem armazenar na ordem de 240000 imagens com as dimensões acima mencionadas (0,25 Mbytes). As cassetes magnéticas de alta densidade, com 2560 bytes por centímetro, podem guardar uma imagem em aproximadamente 1 metro de fita. Os discos ópticos, baseados na tecnologia de escrita e leitura laser têm capacidades de armazenamento que vão até 4 Gbytes, o que corresponde a 16000 imagens armazenadas por disco.

2.3.5 Dispositivos de visualização e de registo

O equipamento mais utilizado para a visualização de imagens nos sistemas de processamento de imagem são os monitores de televisão a cores e/ou monocromáticos. Estes monitores encontram-se ligados à saída vídeo do módulo de visualização no processador de imagem, tal como apresentado na

secção 2.3.2. Para além da visualização do sinal proveniente do módulo de processamento de imagem, os sinais vídeo podem também ser introduzidos num dispositivo de registo de imagem vídeo cuja função é produzir cópias (diapositivos, fotografias e transparências) da imagem observada no écran do monitor.

Outros meios de visualização incluem os dispositivos de impressão tal como impressoras laser, jacto de tinta e térmicas normalmente ligadas directamente a um computador digital.

2.4 O sistema implementado

Esta secção está dedicada ao sistema implementado para a aquisição e processamento digital de imagem. Este sistema está totalmente operacional no Laboratório de Investigação e Desenvolvimento em Interferometria e Difracção Laser, do Departamento de Física da Universidade da Beira Interior. A figura 2-4 mostra uma vista geral desse sistema.



Figura 2- 4 Fotografia do sistema de aquisição e processamento digital de imagem.

As aplicações a serem implementadas no sistema impõem um conjunto de constrangimentos básicos condicionando a selecção do equipamento adequado. Para além disso é muito importante que o equipamento seleccionado possua a flexibilidade e as capacidades necessárias para acomodar as aplicações primárias. Para o trabalho desenvolvido nesta tese, os constrangimentos básicos são:

- imagens com dimensões até 512×512 pixels com 256 níveis de cinzento;
- aquisição de imagens a partir de uma fonte de vídeo monocromática (PAL);
- aquisição de imagem sincronizada por um sinal de sincronismo externo.
- capacidade de executar algoritmos extensos em numerosas matrizes de imagens.

Nas secções seguintes apresenta-se uma descrição detalhada dos componentes de hardware e software do sistema.

2.4.1 Descrição do *hardware*

O processador digital de imagem utilizado é uma placa de aquisição e processamento da *DATA TRANSLATION* modelo *DT3155* [13,14]. É uma placa monocromática programável de elevada precisão a funcionar num sistema *UNIX*, apropriada tanto para aplicações de análise imagem como para visão artificial.

A placa *DT3155* aceita quatro sinais de vídeo, em vários formatos monocromáticos, *RS-170* (padrão para sinais de vídeo monocromáticos de 60 Hz em que a imagem vídeo consiste em 525 linhas, 480 das quais são visíveis), *CCIR* (padrão para sinais vídeo de 50 Hz em que a imagem vídeo consiste de 625 linhas, 576 das quais são visíveis), *NTSC/RS-330* (padrão para sinais de vídeo de cor de 60 Hz; a cor é sobreposta à imagem *RS-170* monocromática, em que a imagem vídeo consiste de 525 linhas, 480 das quais são visíveis) e *PAL* (padrão para sinais vídeo de cor; a cor é sobreposta à imagem *RS-170* monocromática, em que a imagem vídeo consiste de 625 linhas, 576 das quais são visíveis). A placa *DT3155* suporta entrada de vídeo monocromático de um dos quatro canais de vídeo seleccionáveis por software.

A placa *DT3155* digitaliza a imagem, armazenando os dados resultantes da digitalização na memória do sistema do computador, ou transferindo esses mesmos dados digitalizados para o controlador de amostragem do computador a fim de apresentar as imagens em tempo real. A placa aceita sincronização externa e fornece níveis programáveis de preto e branco. Esta placa funciona no modo interlaçado o que faz com que a aquisição da imagem se inicie logo a seguir à detecção do sinal de sincronismo e termine depois da aquisição de uma imagem completa. A placa *DT3155* retira essa informação de sincronismo do canal de entrada ou de um dos sinais de entrada de vídeo composto não utilizados na placa. O sincronismo é utilizado para gerar o tempo horizontal e vertical para a entrada da placa *DT3155*.

Relativamente ao modo de processamento, a placa *DT3155* pode adquirir, tal como referido anteriormente, imagens interlaçadas, sincronizadas ou não e armazená-las na memória do sistema. Numa aquisição com sincronismo não se podem executar outras operações até que a aquisição esteja completa. Numa aquisição assíncrona, existe a possibilidade de execução imediata de outras operações enquanto os dados estão a ser adquiridos.

Nesta placa o nível preto é definido como a tensão abaixo da qual todas as outras tensões são digitalizadas como preto, enquanto que o nível branco é definido como a tensão acima da qual todas as outras tensões são digitalizadas como branco.

A tabela de entrada (*ILUT*) permite a realização de um mapeamento programável nos dados do *ADC* antes de eles serem escritos na memória do módulo de memória interna, para por exemplo se realizar a correcção da gama ou outras manipulações arbitrárias. Os valores dos *pixels* situam-se entre 0 e 255. Se a tabela de entrada for carregada com o padrão identidade, um valor de entrada 0 (preto) tem um valor de saída 0 (preto). Um valor de entrada 1 tem um valor de saída 1 e assim sucessivamente até ao valor 255, que tem um valor de saída 255 correspondente ao branco. No entanto se por exemplo a *ILUT* for carregada com padrão inverso ou negativo, um valor de entrada 0 (preto) tem um valor de saída 255 (branco), um valor de entrada 1 tem um valor de saída 254, e assim sucessivamente até ao valor de entrada 255 (branco) o qual tem um valor de saída 0 (preto).

O módulo de memória interna tem capacidade de armazenamento de 1 Mbyte ou seja uma capacidade de armazenamento de 4 imagens monocromáticas de 512×512 *pixels* que ocupam 0.25 Mbytes.

A velocidade do bus *PCI* permite que a placa *DT3155* transfira um número ilimitado de imagens consecutivas através do bus em tempo real. Podem adquirir-se e armazenar imagens consecutivas, até se esgotar a memória interna disponível, ou opcionalmente, podem-se apresentar as imagens continuamente em tempo real no monitor do sistema. A placa *DT3155* usa a memória interna para guardar imagens e o controlador de amostragem para apresentar as imagens.

Como fonte de vídeo o sistema utiliza câmaras *CCD* de estado sólido monocromáticas da marca *COHU* modelo 4913-5000/0000 [15], de elevada resolução e de alta sensibilidade, com saída de sinal de vídeo composto no formato *CCIR (PAL)*. Estas câmaras de elevada resolução permitem obter uma melhor definição e resultados livres de erro, bem como serem utilizadas num grande domínio de aplicações de segurança/vigilância, científicas e aplicações industriais.

As câmaras *COHU* da série 4910 usam um sensor de transferência de formato interlinha de $1/2''$, com uma microlente que reduz a corrente de escuro bem como a retenção e a fluorescência da imagem, enquanto aumenta o domínio dinâmico e as características espectrais. Este *CCD* permite o controlo manual do gama, do obturador electrónico e do ganho. A área activa da imagem é de $6.4 \times 4.8 \text{ mm}^2$ correspondendo a uma sensor de $1/2''$. Os elementos activos da imagem (*pixels*) são 752 na horizontal e 582 na vertical. As dimensões do *pixel* são de $8.6 \times 8.3 \mu\text{m}^2$ e a resolução é de 560 linhas de televisão horizontais por 450 linhas de televisão verticais. O obturador electrónico permite velocidades de trabalho que vão desde $1/50$ até $1/10000$ do segundo permitindo também a posição de obturador aberto. O factor gama é variável entre 0.45 a 1.0 e o ganho pode ser controlado manualmente ou automaticamente. O obturador electrónico reduz a desfocagem das imagens a alta velocidade enquanto que a elevada sensibilidade do *CCD* permite a operação sobre um largo domínio de níveis de luz.

O computador digital é uma estação de trabalho com processador Intel Pentium III a trabalhar a 450 MHz. A configuração consiste de uma memória *RAM* (memória de acesso aleatório) de 512 Mbytes e uma cache (dispositivo rápido de memória) de 512 Kbytes. Como equipamento de apresentação

externa temos um monitor plano de cor da marca *HP* modelo *D2847* de 21 polegadas das quais 19.8 são visíveis [16], a funcionar a 32 bit tendo uma resolução máxima de 1800×1440 para uma taxa de repetição de 80 Hz. Como equipamento de registo existe uma impressora laser *HP Laserjet 6L*, com uma resolução de 600 pontos por polegada.

2.4.2 Descrição do *software*

Nesta secção descreve-se o programa de computador denominado *ptfX* [17], desenvolvido e implementado para fins de processamento de imagem. É uma aplicação que suporta as características de *hardware* da placa de aquisição e processamento (*frame grabber*) *DT3155* discutido na secção anterior. O programa está escrito em linguagem C e trabalha sobre ambiente X-windows.

As principais funções incluídas no programa estão relacionadas com o controlo da aquisição, do processamento e da análise dos dados da imagem. O programa inicializa-se e apresenta uma janela principal com as diferentes opções: condições iniciais (*Set-up*), Arquivo (*File*), Aquisição (*Acquisition*), Apresentação (*Display*), Processamento (*Processing*) e Sair (*Quit*). As opções são activadas através do rato pressionando os botões na janela principal. Cada opção tem a ela associada um menu descendente com funções executáveis, sendo algumas delas executadas imediatamente depois da activação, enquanto que para outras surge uma outra janela de diálogo para escolha dos parâmetros ou opções específicas antes da sua execução. Todas as janelas de diálogo, tal como os menus descendentes, podem ser movidas com o rato. Quando algum parâmetro ou opção é incorrecto ou está em falta durante a execução, surge no monitor uma janela com uma mensagem de erro específica.

De seguida apresenta-se uma breve descrição sobre cada uma das opções visíveis na janela principal:

- Condições iniciais – Esta opção é usada para se proceder à configuração completa do *hardware* da placa de aquisição e processamento *DT3155*, bem como para se realizar a reinicialização do sistema.
- Arquivo – Esta opção é usada para carregar, gravar e imprimir os dados de uma imagem armazenados na memória virtual ou nos ficheiros de imagens. São suportados vários formatos de imagem.
- Aquisição – Esta opção é usada para iniciar e terminar a aquisição em tempo real dos dados da imagem, para realizar a aquisição sincronizada e para visualizar o perfil horizontal e/ou vertical da distribuição de intensidade da imagem em tempo real. Quando a aquisição da imagem é realizada abre-se uma nova janela no monitor do computador para apresentação dos dados da imagem adquirida.
- Apresentação – Esta opção é usada para abrir, fechar e dimensionar as janelas de apresentação da imagem a 2-D armazenada na memória virtual. Esta opção permite também a visualização em 4 ângulos diferentes de uma imagem em pseudo 3-D.

- Processamento – Esta opção é usada para executar a transferência dos dados da imagem entre a placa de aquisição e as memórias virtuais ou entre memórias virtuais. Dentro deste menu podem ser aplicadas aos dados da imagem operações aritméticas, lógicas, de rotação, de ampliação ou redução, normalização, realce da imagem, nível de brilho e selecção de nível de cinzento. Encontram-se ainda disponíveis menus para calibração do sistema e medições, para visualização do perfil dos dados da imagem e inicialização das memórias virtuais. Nesta opção para além das funções referidas anteriormente existe um menu descendente específico para a análise e processamento dos padrões de difracção da luz laser. Este menu permite a execução e o controlo dos processos de aquisição e processamento das imagens correspondentes aos padrões de difracção bem como a apresentação dos resultados do varrimento obtidos para cada ponto analisado sob a forma de um mapa. No menu relativo à aquisição é possível seleccionar o tipo de aquisição a realizar (modo sequencial ou modo aleatório), o diâmetro do feixe laser de trabalho, o passo com que é realizado o varrimento e as dimensões da área a analisar. Para varrimentos no modo aleatório existe uma opção que se activa, para a escolha do número de pontos a analisar dentro da área previamente seleccionada. Dentro do menu relativo ao processamento selecciona-se o tipo de processamento a aplicar às imagens adquiridas com o menu da aquisição, os níveis de cinzento em que se vai realizar o processamento e outros factores relativos ao factor de rejeição e ao factor de massagem a aplicar aos dados adquiridos.
- Sair – Esta opção é usada para abandonar o programa.

Na figura apresenta-se um esquema resumido dos menus do software utilizado.

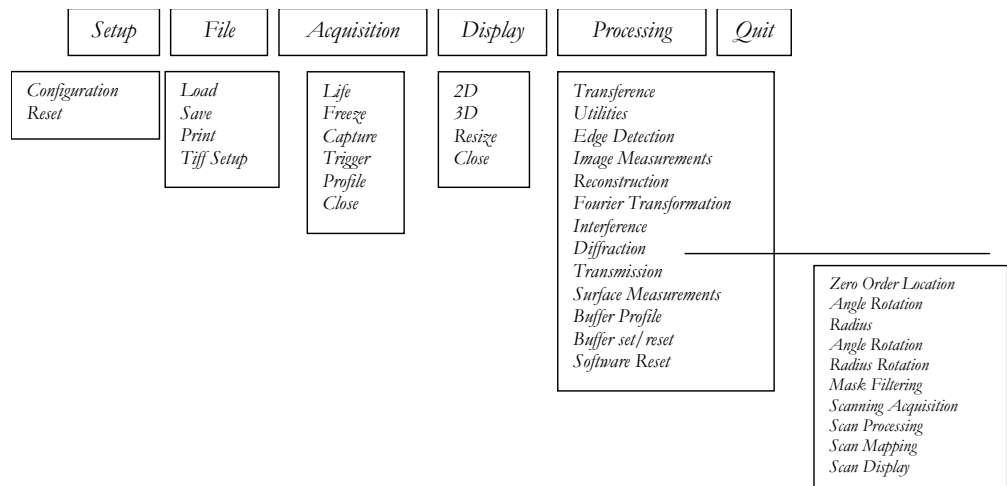


Figura 2- 5 Apresentação esquemática do conjunto de menus disponíveis no software utilizado.

2.5 Resumo

Neste capítulo apresentou-se e discutiu-se o sistema de processamento digital de imagem completo. Este sistema encontra-se fisicamente implementado e disponível no Laboratório de Investigação em Interferometria e Difracção, do Departamento de Física da Universidade da Beira Interior.

Os fundamentos da imagem digital, amostragem e quantificação, em conjunto com uma descrição detalhada dos elementos individuais num sistema de processamento de imagem genérico, foram usados como ponto de partida para o desenvolvimento e posterior implementação do sistema. O sistema foi totalmente descrito e, de uma forma geral, discutidas as suas capacidades e flexibilidade.

Referências

- [1] Schalkoff, R.J., “Digital image processing and computer vision” *John Wiley & Sons, Inc.*, New York (1989).
- [2] Gonzalez, R.C., Wintz, P., “Digital image processing”, *Addison-Wesley Publishing Company*, 2nd Edition, Reading, Massachusetts (1987).
- [3] Jähne, B., “Digital Image Processing: Concepts, algorithms and scientific applications”, *Springer-Verlag*, 2nd Edition, Berlin (1993).
- [4] Andrews, H.C., Hunt, B.R., “Digital image restoration”, *Prentice-Hall, Inc.*, Englewood Cliffs, New Jersey (1977).
- [5] Mees, C.E.K., James, T.H., “The theory of the photographic process”, *Macmillan Company*, New York (1966).
- [6] Hurter, F., Drifffield, V.C., “Photo-chemical investigations and a new method of determination of the sensitiveness of photographic plates”, *J. Soc. Chemical Industry*, **9**, 455-469 (1980).
- [7] Biderman L.M., Nudelman, S., “Photoelectronic imaging devices”, *Plenum Press*, New York (1971).
- [8] Buss, D., Melen, R., “Charge-coupled devices: technology and applications”, *IEEE Press*, New York (1977).
- [9] Barbe, D.F., “Charge-coupled devices”, *Springer-Verlag*, Berlin (1980).
- [10] Elliot, K.H., Mayhew, C.A., “The use of commercial CCD cameras as linear detectors in the physics undergraduate teaching laboratory”, *Eur. J. Phys.*, **19**, 107-117 (1998).
- [11] Hobson, G., “Charge-transfer devices”, *Edward Arnold*, London (1978).
- [12] Pratt, W.K., “Digital Image Processing”, *John Wiley & Sons, Inc.*, New York (1978).
- [13] Mach Series DT3155 User's Manual, *Data Translation Inc.*, Marlboro, MA, (1999).
- [14] DT3155 “High Accuracy Monochrome PCI Frame Grabber”, 2000 Product Handbook, *Data Translation, Inc.*, USA (2000).
- [15] 4910 Series, RS-170 and CCIR Monochrome CCD Cameras, Installation and Operation Instructions, *COHU, Inc.*, Electronics Division, San Diego CA (1995).

- [16] HP D2847 P1110 21-inch Color Monitor User's Guide, *Hewlett Packard* Company, Grenoble (1999).
- [17] Fiadeiro, P.T., "PtfX User's Guide", Application Program for the DT3155 Frame Grabber, Version 1.6 (1995).

Capítulo 3

Caracterização de Redes de Fibras: O Modelo do Poro Equivalente

3.1 Introdução

O estudo da orientação das fibras numa rede de fibras, e no caso particular desta tese, numa folha de papel, é muito importante para uma melhor compreensão da sua estrutura e propriedades físicas. A estrutura do papel é definida através da organização geométrica das fibras e do espaço entre elas na folha de papel, e está dependente do processo de fabrico uma vez que este deforma os agregados das fibras (flocos) quando a pasta chega à caixa de formação da máquina de papel, devido ao efeito das forças de cisalhamento exercidas na suspensão fibrosa da folha em formação [1-3]. Por outro, lado as propriedades físicas estão dependentes da natureza dessa rede de fibras, isto é, da sua composição química, das propriedades morfológicas e da própria estrutura [4-11].

A análise de texturas fibrosas recorrendo à geometria estatística, através das funções de distribuição espacial, permite identificar e quantificar os parâmetros estruturais da rede [3,4,9,12]. Como consequência, a teoria das probabilidades geométricas foi aplicada largamente ao estudo da estrutura do papel [8,13,14]. Vários trabalhos marcaram o desenvolvimento da caracterização de redes de fibras tendo como base estas teorias que permitiram implementar numerosas aplicações dedicadas ao estudo de redes fibrosas de pastas, papéis, cartões, tecidos e não tecidos [1,3,5,6,9,15-18].

As relações estruturais identificadas pelos métodos estatísticos são fundamentais na caracterização de redes de fibras. No entanto, elas não permitem representar a estrutura do meio fibroso sob a forma de um modelo sintético. Pelo contrário, através de uma aproximação baseada na distribuição espacial da curvatura das fibras bem como das interfaces dos poros e das fibras, é possível desenvolver-se uma representação geométrica sintética seguindo um novo conceito que é denominado por “modelo do poro equivalente” e que foi desenvolvido em 1968 por Silvy [1,2,8,12,19].

A identificação dos parâmetros do modelo do poro equivalente efectua-se a partir da análise das probabilidades geométricas dando lugar a uma representação geométrica e sintética da estrutura com aplicações muito vastas. Este conceito foi aplicado ao estudo das estruturas fibrosas, particularmente do papel e aos não tecidos, considerando dois tipos de modelo:

- O modelo bidimensional: no qual os elementos da estrutura são decompostos em segmentos rectilíneos projectados no plano da rede. A importância deste modelo reside no facto de as propriedades físicas, por exemplo do papel, corresponderem às solicitações exercidas no plano da estrutura fibrosa. Esta análise está adaptada ao estudo da orientação da distribuição das fibras consideradas como segmentos rectilíneos [20].
- O modelo tridimensional: no qual os elementos da estrutura se consideram distribuídos no espaço, definindo as interfaces dos poros e das fibras. Este modelo é uma generalização do modelo bidimensional já que a espessura das fibras não é desprezável quando comparada com a espessura da estrutura fibrosa. Esta análise está adaptada ao estudo das propriedades físicas dos meios porosos em geral, tais como, propriedades de transferência de radiação, propriedades ópticas, mecânicas e eléctricas, propriedades de permeabilidade aos fluídos, e propriedades da superfície da folha [13].

Neste capítulo são apresentados os dois tipos de modelo do poro equivalente e a sua base teórica que permite a caracterização da anisotropia e do ângulo de orientação da distribuição de fibras, tanto à superfície como no volume da folha de papel, podendo ser alargado ao estudo de outros tipos de redes de fibras. Na secção 3.2 é feito um estudo da estrutura bidimensional das redes de fibras, apresentando-se algumas vantagens das funções de densidade de orientação das fibras ponderadas em comprimento relativamente às ponderadas em número. Define-se também nesta secção a relação entre a anisotropia e o ângulo médio de orientação. Na secção 3.3 é efectuada uma análise das estruturas tridimensionais e na secção 3.4 é feito um breve resumo de todo o capítulo.

3.2 Análise bidimensional das estruturas fibrosas

Tal como já foi referido na secção 3.1, no modelo bidimensional as fibras são decompostas em segmentos cuja curvatura é considerada suficientemente pequena para poder ser considerada rectilínea [1], em contraponto a outros métodos que geralmente não têm em consideração a curvatura das fibras, aproximando a direcção das fibras à direcção correspondente à linha média da fibra. A caracterização da distribuição espacial desses segmentos rectilíneos no plano da folha, é feita recorrendo à orientação de cada segmento em relação a um eixo de referência $x'Ox$, que em geral corresponde à direcção transversal da folha que é perpendicular à direcção de fabrico do papel, ver figura 3-1.

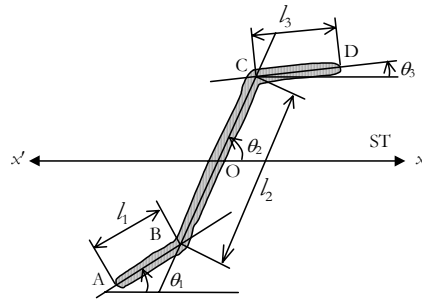


Figura 3-1 Decomposição das fibras em pequenos segmentos de comprimentos l_1 , l_2 e l_3 que podem ser considerados como sendo rectilíneos.

Por razões de simetria, a orientação θ_i de um segmento rectilíneo é definida no intervalo $[0, \pi[$ radianos. Assim, as funções de repartição em orientação tal como as funções de densidade de orientação têm uma periodicidade de π radianos.

3.2.1 As funções de densidade de orientação ponderadas em número

Por definição a repartição acumulada em número de segmentos rectilíneos, cuja orientação está no intervalo $[0, \pi[$, é representada por:

$$\Theta_\theta = \frac{N_\theta}{N} \quad (3-1)$$

onde N_θ é o número de segmentos acumulados por unidade de superfície cuja orientação está compreendida entre 0 e θ , independentemente dos seus comprimentos, e N é o número total de segmentos existentes no intervalo $[0, \pi[$, isto é, $[\Theta_\theta]_0^\pi = 1$.

A variação da repartição acumulada em número de fibras com orientação no intervalo $[\theta, \theta + \Delta\theta[$, define a densidade em orientação ponderada em número de fibras na direcção θ pela relação:

$$\eta_\theta = \lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} \frac{\Theta_{(\theta+\Delta\theta)} - \Theta_\theta}{\Delta\theta} = \lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} \frac{N_{(\theta+\Delta\theta)} - N_\theta}{N\Delta\theta} = \frac{d}{d\theta} [\Theta_\theta] \quad (3-2)$$

A densidade de orientação ponderada em número tem um valor finito visto que a enumeração de linhas numa direcção da rede fibrosa é na prática limitada pela largura das fibras e pelo poder de resolução da instrumentação utilizada para as referenciar. Nestas condições tem-se que:

$$\int_0^\pi \eta_\theta d\theta = [\Theta_\theta]_0^\pi = 1, \quad (3-3)$$

o que, para o caso de uma distribuição de orientação isotrópica de fibras no plano fornece uma densidade de orientação ponderada em número constante e de valor igual a

$$\eta_\theta = 1/\pi. \quad (3-4)$$

3.2.2 As funções de densidade de orientação ponderadas em comprimento

Por definição a repartição acumulada em comprimento de fibras, cuja orientação está compreendida no intervalo $[0, \theta[$, é representada por:

$$\Psi_\theta = \frac{L_\theta}{L}, \quad (3-5)$$

onde L_θ é o comprimento acumulado dos segmentos projectados sobre o plano da rede por unidade de área cuja orientação está compreendida entre 0 e θ , e L é o comprimento total acumulado de segmentos por unidade de área. L pode também ser definido em função da massa por unidade de área da folha M , gramagem da folha, e da massa por unidade de comprimento das fibras na folha m , pela relação:

$$L = \frac{M}{m}. \quad (3-6)$$

O valor de m depende da composição da fibra que, tal como já foi referido na secção 3.1, possui uma espessura que depende da espécie vegetal, da sua morfologia, da sua composição química e do processo de fabrico que foi utilizado na preparação da pasta de papel.

A densidade de orientação ponderada em comprimento, $\eta_{l\theta}$, das fibras na direcção θ é a definida pela variação da repartição acumulada do comprimento das fibras com orientação no intervalo $[\theta, \theta + \Delta\theta[$, ou seja,

$$\eta_{l\theta} = \lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} \frac{1}{L} \left(\frac{L_{(\theta+\Delta\theta)} - L_\theta}{\Delta\theta} \right) = \frac{1}{L} \frac{d}{d\theta} [L_\theta]. \quad (3-7)$$

Tal como para as funções de orientação ponderadas em número, $\eta_{l\theta}$ pode ser definido para todas as direcções no intervalo $[0, \pi[$ e nesta condição:

$$\int_0^\pi \eta_{l\theta} d\theta = \frac{1}{L} [L_\theta]_0^\pi = 1, \quad (3-8)$$

o que, para o caso de uma distribuição de orientação isotrópica dos comprimentos acumulados das fibras no plano a densidade de orientação ponderada em comprimento é constante e de valor

$$\eta_{l\theta} = \frac{1}{\pi}. \quad (3-9)$$

3.2.3 Relação entre as densidades de orientação ponderadas em comprimento e em número

A cada direcção no plano da rede de fibras pode associar-se um segmento com um comprimento médio ℓ_θ que é igual ao comprimento médio dos segmentos das fibras com orientação no intervalo $[\theta, \theta + \Delta\theta]$. Este valor do comprimento médio dos segmentos na direcção θ pode assim ser definido pela relação:

$$\ell_\theta = \lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} \frac{L_{(\theta+\Delta\theta)} - L_\theta}{N_{(\theta+\Delta\theta)} - N_\theta} = \frac{L \eta_{l\theta}}{N \eta_\theta}. \quad (3-10)$$

Assim, é possível estabelecer uma relação entre as funções de densidade de orientação ponderadas em número e em comprimento que se traduz por

$$\eta_{l\theta} = \frac{\ell_\theta}{\ell} \eta_\theta, \quad (3-11)$$

onde ℓ é o comprimento médio dos segmentos na rede fibrosa, qualquer que seja a sua orientação, e que depende do comprimento total e do número total de fibras acumuladas na área da amostra,

$$\ell = L/N. \quad (3-12)$$

Da equação 3-11 resulta que as densidades de orientação ponderadas em número e em comprimento η_θ e $\eta_{l\theta}$, são iguais se o comprimento do segmento médio direccional, ℓ_θ , das fibras for constante para todas as direcções.

Silvy [1], observou que no caso de papéis de fabrico corrente, a distribuição espacial dos segmentos é acompanhada de uma distribuição anisotrópica dos comprimentos médios desses segmentos relativamente às duas direcções principais da folha, a direcção máquina (*DM*) e a direcção transversal (*DT*). Do estudo efectuado também se constata que existe uma boa correlação entre o valor da anisotropia do comprimento médio dos segmentos para as direcções *DM* e *DT*, dada pela relação ℓ_{DM}/ℓ_{DT} , e o valor da elipticidade que caracteriza a distribuição espacial das fibras no plano da folha segundo o modelo do poro equivalente.

A expressão obtida para a densidade de orientação ponderada em número referida por vários autores, Steenberg, Donotsas, Kallmes, não entra em consideração com o comprimento das fibras, o que significa que a contribuição das fibras curtas para as propriedades da rede é a mesma das fibras maiores. Isto não é realista uma vez que a orientação das fibras está maioritariamente relacionada com as propriedades mecânicas da rede. Por esta razão, a densidade de orientação ponderada em comprimento é muito mais apropriada do que a densidade de orientação ponderada em número quando se analisa a estrutura da rede fibrosa e se estabelecem correlações entre a orientação e as suas propriedades mecânicas e físicas [1,3,9,21].

3.2.4 A relação da anisotropia e do ângulo médio de orientação em redes de fibras bidimensionais

Uma folha de papel, por exemplo, que seja fabricada segundo as regras da indústria papelreira apresenta uma simetria estrutural em relação à sua direcção de fabrico. As direcções principais da folha, a direcção máquina (*DM*) e a direcção transversal (*DT*) são perpendiculares entre si e aparecem como eixos de simetria que se identificam com os eixos principais da estrutura.

Assim, é habitual na indústria papelreira caracterizar a anisotropia de orientação de uma folha de papel pelo valor da relação das características físicas medidas na direcção máquina e na direcção transversal da folha.

A importância da anisotropia de orientação da estrutura pode ser avaliada calculando o ângulo médio de orientação, através da direcção baricêntrica da orientação dos segmentos num intervalo $[0, \pi/2[$ relativo à direcção transversal [5]. O ângulo de orientação médio, no caso da densidade de orientação ponderada em comprimento de fibras, é então dado por:

$$\bar{\theta}_{nl} = \frac{\int_0^{\pi/2} \eta_{l\theta} \theta \, d\theta}{\int_0^{\pi/2} \eta_{l\theta} \, d\theta} = 2 \int_0^{\pi/2} \eta_{l\theta} \theta \, d\theta, \quad (3-13)$$

o que, no caso de uma estrutura com uma distribuição de orientação isotrópica conduz a $\bar{\theta}_{nl} = \pi/4$. Esta condição é necessária mas não é suficiente quando se pretende caracterizar uma distribuição de orientação isotrópica.

Quando a distribuição tem uma direcção principal diferente da direcção máquina, o valor do ângulo de orientação médio deve ser calculado sempre no intervalo $[0, \pi[$, mas centrado na sua direcção de orientação principal. Na prática, se a direcção de orientação principal difere ligeiramente da direcção máquina, a média das direcções baricêntricas nos intervalos $[0, \pi[$ e $[\pi/2, \pi[$ pode fornecer o valor do ângulo de orientação média.

3.2.5 Densidade linear de intersecção das fibras

Segundo Underwood [22], as intersecções entre uma recta orientada segundo uma determinada direcção e o material constituinte de um meio poroso, permite estabelecer resultados importantes para a análise da estrutura desse meio poroso. Por definição a densidade linear de intersecção das fibras para uma direcção α , $\eta_{l\alpha}$, corresponde ao número de intersecções das fibras, por unidade de comprimento, entre uma linha de direcção α , traçada no plano da rede, e as fibras da rede quaisquer que sejam as suas

orientações. Silvy [1], realizou este estudo sobre uma fracção representativa de fibras coloridas que foram dispersas na pasta de papel antes da formação da folha.

De acordo com as notações previamente definidas e considerando uma área unitária numa rede de fibras, existem nessa área $N\eta_\theta$ segmentos de fibras lineares na direcção θ . Considerando agora uma linha recta $P_{L,\alpha}$, de comprimento p segundo a direcção α (ver figura 3-2), que atravessa essa área e um segmento de fibra de comprimento q na direcção θ , este intercepta a linha $P_{L,\alpha}$ se o seu centro I estiver situado no máximo a uma distância b de $P_{L,\alpha}$. Assim, o segmento de fibra que intercepta $P_{L,\alpha}$ tem de estar numa área de largura $2b$ e comprimento p .

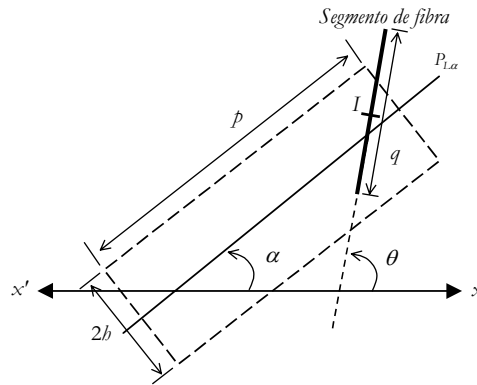


Figura 3-2 Análise da probabilidade de intersecção de um segmento de fibra com uma linha de direcção α .

De acordo com a figura 3-2 pode expressar-se a distância b por

$$b = \frac{1}{2} q |\text{sen}(\theta - \alpha)|. \quad (3-14)$$

Generalizando este estudo para todos os segmentos de fibras orientados segundo a direcção θ dentro da estrutura fibrosa, tem de se utilizar o comprimento médio q_θ de todas esses segmentos orientados segundo a direcção θ e a área média onde os centros de todos os segmentos de fibras devem estar posicionados por forma a cruzarem a linha $P_{L,\alpha}$. Essa área média é definida pela distância média máxima b_θ a que têm de estar os centros dos segmentos das fibras por forma a interceptarem a linha $P_{L,\alpha}$ e pelo comprimento p dessa mesma linha. Nestas condições a distância b_θ vem dada por

$$b_\theta = \frac{1}{2} q_\theta |\text{sen}(\theta - \alpha)|, \quad (3-15)$$

e a área média onde os centros devem estar posicionados vem dada por

$$A = p \times 2b_\theta = p q_\theta |\text{sen}(\theta - \alpha)|. \quad (3-16)$$

Como a área média A contém $Np\eta_\theta q_\theta |\text{sen}(\theta - \alpha)| d\theta$ segmentos de fibras na direcção θ , então para a direcção α , o número de intersecções lineares por unidade de comprimento médio dos segmentos de fibras com direcção θ será definido por

$$dP_{i\alpha} = N\eta_{\theta} \ell_{\theta} |\text{sen}(\theta - \alpha)| d\theta, \quad (3-17)$$

e por conseguinte, a densidade linear de intersecção dos segmentos para uma dada direcção α vem dada por

$$\eta_{i\alpha} = N \int_0^{\pi} \eta_{\theta} \ell_{\theta} |\text{sen}(\theta - \alpha)| d\theta. \quad (3-18)$$

Tendo em conta as equações 3-11 e 3-12 obtém-se que

$$\eta_{i\alpha} = L \int_0^{\pi} \eta_{\theta} |\text{sen}(\theta - \alpha)| d\theta \quad (3-19)$$

e, através da equação 3-7, pode escrever-se que

$$\eta_{i\alpha} = \int_{L_{\theta=0}}^{L_{\theta=\pi}} |\text{sen}(\theta - \alpha)| dL_{\theta}. \quad (3-20)$$

$\eta_{i\alpha}$ é igual ao comprimento dos segmentos da rede de fibras por unidade de superfície, projectada sobre a direcção perpendicular a α .

O valor médio da densidade linear da intersecção das fibras para todas as orientações no plano é dado por:

$$\langle \eta \rangle = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \eta_{i\alpha} d\alpha = \frac{1}{\pi} \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} dL_{\theta} \int_0^{\pi} |\text{sen}(\theta - \alpha)| d\alpha = \frac{L}{\pi} \int_0^{\pi} |\text{sen}(\theta - \alpha)| d\alpha, \quad (3-21)$$

ou seja, integrando

$$\langle \eta \rangle = \frac{2L}{\pi}. \quad (3-22)$$

O valor de $\langle \eta \rangle$ é igual ao factor $2/\pi$ próximo do comprimento por unidade de superfície da rede, qualquer que seja a natureza da distribuição espacial das fibras no plano. Este parâmetro intrínseco da estrutura fibrosa pode também ser expresso tendo em conta a equação 3-6:

$$\langle \eta \rangle = \frac{2}{\pi} \frac{M}{m}. \quad (3-23)$$

Desta forma é possível conhecer a massa por unidade de superfície ou a massa linear das fibras de uma rede a partir de observações efectuadas sobre as intersecções numa rede fibrosa [1].

3.2.6 O poro equivalente de uma rede bidimensional

Silvy [1,12], desenvolveu a caracterização da estrutura de uma rede de fibras tendo em consideração a organização dos poros nessa rede. No plano da rede de fibras, os poros são polígonos envolvidos por fibras dispostas em diferentes direcções. Colocando topo a topo os segmentos lineares de fibras da rede obtém-se um arco S_{θ} , descrito no plano, conforme se representa na figura 3-3.

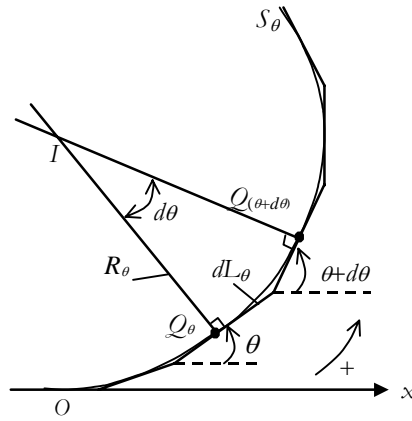


Figura 3- 3 O modelo do poro equivalente.

Seja R_θ o raio de curvatura do arco S_θ no ponto M_θ , onde a tangente possui orientação θ ao longo da curva, S_θ a coordenada angular de M_θ ao longo do contorno e Ox a direção para a orientação $\theta = 0$. Nestas condições,

$$R_\theta = \frac{dL_\theta}{d\theta} = \lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} \frac{S_{(\theta+\Delta\theta)} - S_\theta}{\Delta\theta}. \quad (3- 24)$$

Atendendo à equação 3-7 vem que

$$R_\theta = L \eta_{l\theta}. \quad (3- 25)$$

Do mesmo modo, segundo esta definição, a densidade de orientação ponderada em comprimento $\eta_{l\theta}$ é proporcional ao raio de curvatura do arco S_θ em cada ponto onde a tangente tem por direção θ . De notar que o índice θ do raio de curvatura caracteriza a direção segundo a tangente à curva. O arco S_θ assim descrito no plano da rede tem a mesma periodicidade π e as mesmas propriedades de simetria da função $\eta_{l\theta}$, pelo que forma um contorno que admite um centro de simetria.

Por razões de simetria, pode definir-se o perímetro P desse contorno pela equação:

$$P = \int_C dL_\theta = \int_0^{2\pi} R_\theta d\theta = 2L \int_0^\pi \eta_{l\theta} d\theta \quad (3- 26)$$

e atendendo à equação 3-11 obtém-se que

$$P = 2L. \quad (3- 27)$$

A curva fechada está assim envolvida pelos segmentos de fibras, ver figura 3-4. A sua forma é homotética com a forma do poro médio da rede de fibras, se o poro for considerado como um polígono médio.

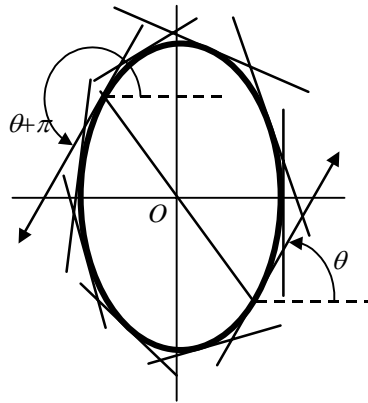


Figura 3- 4 Figura do poro equivalente é delimitada pelos segmentos rectilíneos das fibras.

O perímetro do contorno definido por S_θ é igual ao dobro do comprimento superficial L da rede. As relações dadas pelas equações 3-25 e 3-27 definem desta forma a figura denominada de "poro equivalente" da rede.

O poro equivalente desenha a envolvente dos poros que for possível traçar no limite a partir de um processo de rectificação das malhas da rede reduzindo-as a uma figura poligonal única. Resulta desta definição que sobre o contorno do poro equivalente, o perímetro de um arco é equivalente ao comprimento das fibras correspondentes ao intervalo $\Delta\theta$ considerado, por unidade de área da amostra.

3.2.7 Poros equivalentes em redes bidimensionais

Apesar das diferentes curvas planas possíveis para a representação de poros equivalentes, devem considerar-se aquelas que possuem um centro de simetria, que não apresentam descontinuidades nem pontos no infinito e cuja densidade de orientação é finita em todas as direcções do plano.

A escolha de um contorno elíptico, figura centro-simétrica tendo em conta a periodicidade das funções de distribuição de orientação das fibras, é uma escolha que em primeira análise será a mais provável para a caracterização de uma rede anisotrópica. Efectivamente, a elipse e os conjuntos de elipses são importantes para representar o poro equivalente de redes, cujas estruturas parecem complexas e infinitamente variadas. A forma da elipse tem a vantagem de poder ser caracterizada por um único parâmetro que é a sua elipticidade a/b , que é definida pela razão entre os dois semi-eixos maior e menor de uma elipse.

Recorrendo às propriedades geométricas da elipse, a elipticidade também é definida por

$$\frac{a}{b} = \sqrt[3]{\frac{R_{\max}}{R_{\min}}}, \quad (3-28)$$

onde R_{\max} e R_{\min} são os raios de curvatura na direcção dos eixos maior e menor da elipse, respectivamente. Da equação 3-25 a elipticidade pode assim ser expressa por

$$\frac{a}{b} = \sqrt[3]{\frac{\eta_{l\theta_{\max}}}{\eta_{l(\theta_{\max} + \frac{\pi}{2})}}}, \quad (3-29)$$

onde $\eta_{l\theta_{\max}}$ é a densidade de orientação ponderada em comprimento na direcção de orientação principal.

A densidade de orientação em qualquer direcção pode ser obtida através do raio de curvatura de uma elipse, que representa os aspectos geométricos da rede fibrosa no plano da rede. O conhecimento de a/b e da direcção de orientação principal é suficiente para calcular a densidade de orientação em qualquer direcção através da expressão do raio de curvatura [1,3]. Atendendo à equação 3-25 e desenvolvendo em série a expressão do perímetro total L das fibras pode escrever-se que

$$\eta_{l\theta} = \frac{1 - e^2}{\pi [1 - f(e)] [1 - e^2 \sin^2 \theta]^{3/2}}, \quad (3-30)$$

onde e é a excentricidade da elipse e $f(e) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{2n} / (2n - 1) \left(\prod_{p=1}^n 2p - 1/2p \right)^2$ [1].

O modelo do poro equivalente tem a grande vantagem de qualquer expressão analítica da função de densidade de orientação da distribuição das fibras estar estritamente relacionada com as propriedades geométricas da rede de fibras e de reduzir o número de parâmetros que são necessários para a caracterização dessa rede.

Da equação 3-30 é possível calcular-se a densidade de orientação da distribuição das fibras unicamente em função do valor da excentricidade do poro equivalente que é definida a partir da elipticidade desse mesmo poro equivalente.

A elipticidade do poro equivalente torna-se um parâmetro muito útil na caracterização da distribuição de orientação das fibras uma vez que é facilmente quantificado a partir da forma da figura (elíptica) correspondente ao poro equivalente. Por exemplo, num papel isotrópico as fibras não têm uma orientação preferencial, desta forma existe o mesmo comprimento acumulado de fibras em todas as direcções. Assim, o poro equivalente está envolvido pelo mesmo número de fibras em todas as direcções o que indica que o poro equivalente tem uma forma circular. Nestas condições a sua elipticidade é igual à unidade, o que através da equação 3-30 corresponde a uma densidade de

orientação constante e igual a $1/\pi$, resultado este que está de acordo com o que se obtém com a equação 3-9.

Outras funções que não a elipse são utilizadas para o estudo da distribuição de orientação de fibras em redes. A função utilizada com mais frequência, no caso específico do papel, é uma função que corresponde a um desenvolvimento em série de Fourier, frequentemente limitada aos dois primeiros termos, isto é, $\eta_\theta = 1/\pi + e \cos 2\theta$, onde o parâmetro e caracteriza a excentricidade da distribuição e está relacionado com as densidades lineares de intersecção segundo as duas direcções principais da rede [1]. É necessário salientar no entanto que este conceito geométrico do poro equivalente, se verificado na prática, revela-se mais preciso e exacto e, devido à sua simplicidade, quando comparado com as funções de repartição das fibras que envolvem desenvolvimentos em série, torna-se de fácil representação conceptual e manipulação.

3.3 Modelo tridimensional da estrutura da folha de papel

A estrutura da folha de papel pode ser descrita, assumindo-se que as fibras se encontram distribuídas em planos estratificados, sobrepostos na espessura da folha. Em cada um desses planos as fibras são decompostas em segmentos rectilíneos. Este arranjo permite a definição de uma densidade de orientação η_θ , ponderada em número de segmentos contidos dentro de um intervalo angular $d\theta$, relativo a um eixo, normalmente a direcção transversal da folha de papel (DT). Esta densidade numérica, quando ponderada pelo comprimento dos segmentos q_θ , ao longo de cada direcção, resulta numa densidade de orientação ponderada em comprimento $\eta_{l\theta}$. Dentro do intervalo angular $d\theta$, $\eta_{l\theta}$ é proporcional ao comprimento do arco do contorno no plano da folha obtido pela distribuição dos segmentos rectilíneos preservando a sua orientação e colocados topo com topo sequencialmente. A forma da curva assim obtida é homotética com o poro da folha de papel. O contorno geométrico representado no modelo estrutural é chamado poro equivalente bidimensional. A sua forma é suficiente para definir a distribuição de orientação das fibras no plano da folha. Uma figura elíptica representa o poro equivalente com uma boa precisão para a grande maioria dos papéis industriais. Assim, é possível definir a distribuição de fibras no papel em função de uma única variável, a elipticidade da figura elíptica, dada pela razão entre os comprimentos dos semi-eixos principais da elipse a/b .

Contudo algumas propriedades do papel dependem das características da textura relacionada com a espessura do papel [8]. Assim, é necessário a existência de um modelo tridimensional, baseado não na densidade de orientação das fibras, mas na densidade dos elementos superficiais das paredes das fibras. Estes constituem a envolvente das interfaces dos poros e das fibras na textura do papel. A envolvente na ausência de singularidades é uma superfície contínua fechada $S(x, y, z)$ definida pela densidade

superficial da área acumulada das interfaces que possuem a mesma orientação dentro da textura fibrosa (ver figura 3.5).

A estrutura tridimensional de uma rede de fibras, pode ser modelizada usando uma superfície curva equivalente, homotética com a definida pelo volume de um poro médio da estrutura a três dimensões, que representa a orientação e a densidade das superfícies entre os poros e as fibras [2,8,13]. Por essa razão este modelo geométrico proposto por Silvy [2,8] é denominado de poro equivalente tridimensional. O modelo tridimensional permite o estudo de propriedades que dependem da porosidade e da anisotropia de orientação da distribuição das fibras. Exemplos dessas propriedades são a rugosidade superficial da folha, as propriedades ópticas do papel na transmissão e dispersão da luz na estrutura fibrosa, a distribuição dos poros e a permeabilidade direccional aos fluidos através da folha.

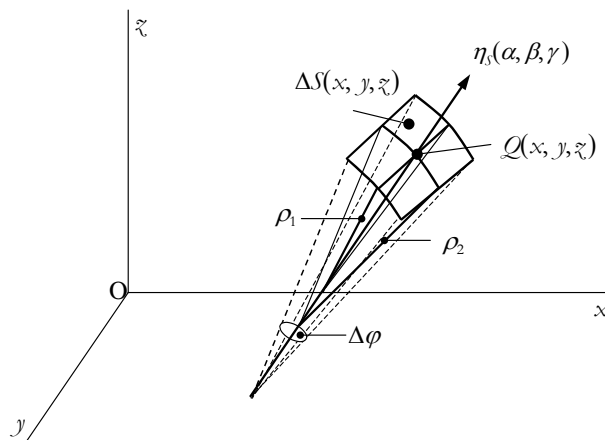


Figura 3- 5 Elemento da superfície de $S(x, y, z)$ delimitado por um elemento de ângulo em torno da direcção média (α, β, γ) representando a área acumulada das microfaces elementares com a mesma orientação na estrutura.

A área acumulada das superfícies elementares ΔS , que têm a mesma orientação na estrutura pode ser observada, num sistema de eixos ortogonais Ox , Oy , e Oz como um elemento da superfície de $S(x, y, z)$ delimitado por um elemento de ângulo sólido $\Delta\varphi$ relativamente à direcção média (α, β, γ) .

A densidade superficial $\eta_s(\alpha, \beta, \gamma)$ das interfaces entre os poros e as fibras é definida como sendo proporcional à variação em ΔS por intervalo de ângulo sólido, ou seja

$$\eta_s(\alpha, \beta, \gamma) = k \lim_{\Delta\varphi \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta\varphi}, \quad (3- 31)$$

isto é,

$$\eta_s(\alpha, \beta, \gamma) = k \frac{dS}{d\varphi} \quad (3- 32)$$

sendo k uma constante.

Através da escolha da constante k é possível obter-se uma expressão adimensional para a densidade superficial das interfaces η_s e normalizá-la num intervalo para o qual a normal percorre todas as orientações das interfaces na estrutura. Nestas condições, como

$$\int_{4\pi} \eta_s d\varphi = 1 \quad (3-33)$$

então $k = 1/S$, sendo S a área total das interfaces da amostra. Por substituição deste resultado na equação 3-32 resulta que

$$\eta_s(\alpha, \beta, \gamma) = \frac{1}{S} \frac{dS}{d\varphi}. \quad (3-34)$$

Recorrendo às propriedades geométricas dos elipsóides pode expressar-se $dS/d\varphi$ em função dos raios de curvatura R_1 e R_2 correspondentes às direcções principais de um elemento de superfície $S(x, y, z)$ num ponto Q (ver figura 3-5) através da relação:

$$\frac{dS}{d\varphi} = R_1 R_2. \quad (3-35)$$

Assim, por substituição na equação 3-34, a densidade superficial das interfaces da estrutura é dada por:

$$\eta_s(\alpha, \beta, \gamma) = \frac{R_1 R_2}{S}. \quad (3-36)$$

Representando tridimensionalmente a superfície $S(x, y, z)$, identificada pela equação 3-36, obtém-se um modelo para a estrutura fibrosa que preserva a orientação das normais nas superfícies entre poros e fibras e representa a distribuição dessas orientações à superfície.

Este modelo é portanto a representação conforme de uma propriedade geométrica da estrutura que é essencial para o estudo de um grande número de fenómenos físicos e químicos [2,8].

A curvatura do espaço na interface dos poros e das fibras aparece assim medianizada depois de uma remodelação da estrutura (ver figura 3-6).

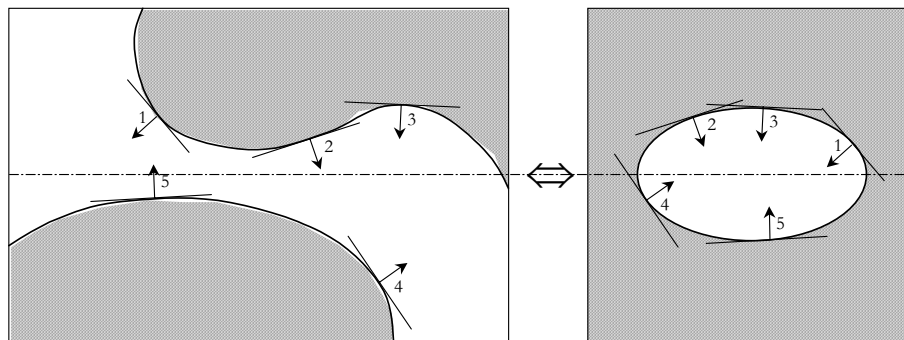


Figura 3- 6 A equivalência de um meio poroso com o respectivo poro equivalente.

O modelo assim definido pode ser denominado por poro equivalente, uma vez que, a forma delimitada pela sua superfície é homotética com a construída a partir de um centro O e tendo como diâmetros os

valores médios das secantes nos poros, para as diferentes direcções no espaço $\langle g(\theta, \zeta) \rangle$, delimitando assim um poro médio representativo da estrutura da rede (ver figura 3-7).

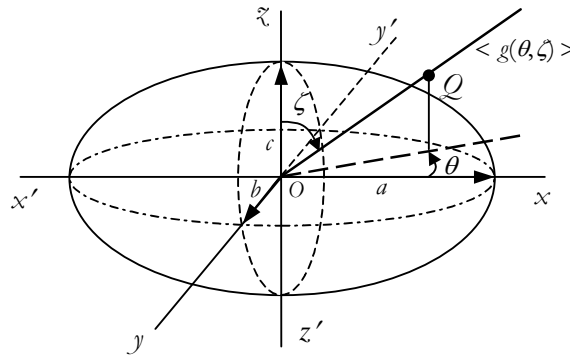


Figura 3- 7 Poro médio representativo da estrutura da rede de fibras.

Um outro método de identificar o poro equivalente utiliza a fracção linear das secantes nos poros $L_L(\theta, \zeta)$ para os trajectos numa direcção (θ, ζ) , a fracção volúmica dos poros da estrutura V_V , a porosidade aplicada ao espaço dos poros ε e o número de intersecções lineares direccionais $P_L(\theta, \zeta)$ entre uma linha recta orientada segundo a direcção (θ, ζ) e as interfaces na estrutura (ver figura 3-8).

Através de uma análise estereológica quantitativa [8,22,23], obtém-se que a fracção volúmica dos poros na estrutura V_V é equivalente à fracção linear das secantes nos poros para cruzamentos numa dada direcção ($L_L(\theta, \zeta)$) e à porosidade da estrutura [2,13,23], isto é,

$$L_L(\theta, \zeta) = V_V = \varepsilon . \quad (3- 37)$$

Aplicando a equivalência dada pela equação 3-37 ao espaço dos poros vem que [2]

$$\frac{P_L(\theta, \zeta)}{2} \langle g(\theta, \zeta) \rangle = \varepsilon . \quad (3- 38)$$

Da mesma forma , aplicando-se a equivalência dada pela equação 3-37, ao espaço das fibras vem [2]

$$\frac{P_L(\theta, \zeta)}{2} \langle l(\theta, \zeta) \rangle = 1 - \varepsilon \quad (3- 39)$$

onde $\langle g(\theta, \zeta) \rangle$ é o valor médio da secante nos poros e $\langle l(\theta, \zeta) \rangle$ é o valor médio da secante na fase complementar (das fibras) para a direcção (θ, ζ) .

Tendo em atenção as equações 3-38 e 3-39 resulta que

$$\frac{\langle g(\theta, \zeta) \rangle}{\langle l(\theta, \zeta) \rangle} = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} = \text{constante} \quad (3- 40)$$

qualquer que seja a direcção considerada (θ, ζ) .

Assim, o poro médio e a forma média das fibras interceptadas pelos cruzamentos na estrutura são duas figuras semelhantes. Este resultado é importante uma vez que permite estender ao espaço complementar dos poros as propriedades geométricas identificadas a partir da análise da interface dos poros e das fibras para a modelização da estrutura.

Na prática, a determinação do número de interfaces dos poros e das fibras efectua-se a partir da medição do valor médio das intersecções lineares direccionais $P_L(\theta, \zeta)$ de uma linha recta na direcção (θ, ζ) com as interfaces na estrutura. Do teorema de Saltikov [2] resulta que o valor de $P_L(\theta, \zeta)$ é igual à superfície específica do meio S_V , constituído pelos poros e pelas fibras, projectada sobre o plano perpendicular à direcção (θ, ζ) (ver figura 3-8).

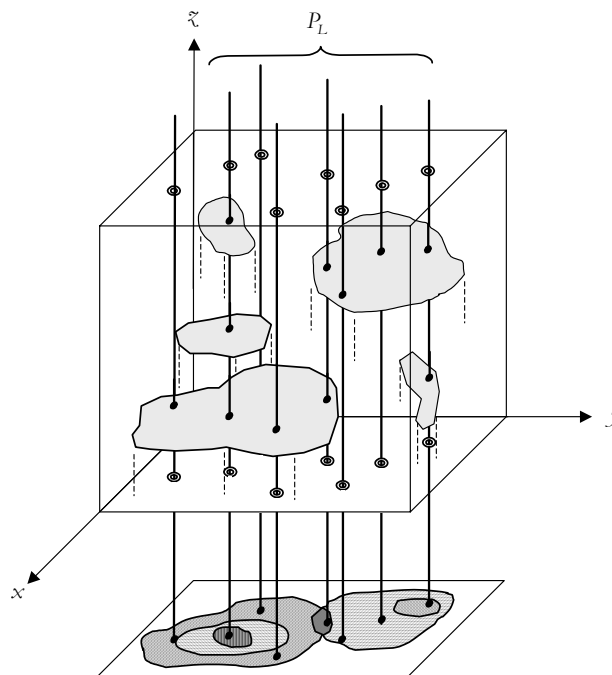


Figura 3- 8 Modelo de um cubo contendo superfícies aleatórias interceptadas por linhas de teste verticais distribuídas aleatoriamente.

Assim, no caso de um volume unitário, a área da superfície $S(x, y, \zeta)$ do poro equivalente tem o valor da área superficial específica. A identificação do poro equivalente tridimensional, definido na secção 3.3.1, fica assim reduzida a uma superfície curva no espaço tridimensional para a qual os valores das projecções dadas pelas intersecções lineares $P_L(\theta, \zeta)$, medidos em diferentes direcções do espaço, são conhecidos.

Este método de identificação do poro equivalente pode substituir o método definido pela equação 3-36, sendo mais geral e preciso porque não envolve a diferenciação relativamente à função original $S(x, y, \zeta)$. Além disso, a medição dos cruzamentos lineares direccionais é uma técnica convencional largamente utilizada na análise de estruturas polifásicas por estereometria ou tomografia através de analisadores de imagem [13].

A superfície curva caracteriza a distribuição de orientação das interfaces dos poros e das fibras na estrutura. Esta superfície é homotética com a definida pelo volume do poro médio da estrutura a três dimensões.

Foi verificado [8] que os poros equivalentes elipsoidais produzem uma boa caracterização das estruturas porosas, nomeadamente para o papel. Os únicos parâmetros necessários na definição do modelo são as elipticidades a/b e c/b e a área superficial do elipsóide (igual à área superficial específica da folha de papel).

3.4 Resumo

Neste capítulo apresentou-se o modelo para as estruturas dos meios fibrosos bidimensionais e tridimensionais como uma representação geométrica: o modelo do poro equivalente. É uma aproximação que tem em consideração a curvatura das fibras assim como a interface entre poros e fibras. A utilização do conceito do poro equivalente tem muitas vantagens. É uma poderosa ferramenta matemática para modelizar medições experimentais da densidade de orientação ponderada em comprimento. Quando comparada com outras funções os seus resultados são mais satisfatórios, pelo que é mais recomendada para a descrição da distribuição de orientação ponderada em comprimento da rede fibrosa. No entanto, a sua maior vantagem reside no facto de ser um modelo geométrico próximo da realidade da organização das fibras numa rede, dando lugar a uma representação sintética da estrutura fibrosa susceptível de ser aplicada na caracterização de vários parâmetros da estrutura das amostras, em particular, a anisotropia da orientação e a orientação principal das fibras na folha do papel.

Referências

- [1] Silvy, J., “Étude Structurale de Milieux Fibreux”, *These de Doctorat d'Etat Institut National Polytechnique et Université Scientifique et Medicale*, Grenoble (1980).
- [2] Silvy, J., “La Transformation Conforme du Pore Equivalent: Methode d' Homogeneisation de la Texture des Milieux Polyphasés”, *Colection Recents Progrés en Génie des Procédés, Phenomenes Fondamentaux en Génie des Procédés*, Coordinateurs J. Bertrand, C. Gourdin, J.P. Riba, Vol. 3, 7, 484-483 (1989).
- [3] Schaffnit, C., Silvy, J., Dodson, C.T.J., “Orientation Density Distributions of Fibres in Paper”, *Nordic Pulp and Paper Research Journal* 7, 3, 121-125 (1992).
- [4] Corte, H., “The Structure of Paper”, , In “The structure and physical properties of paper”, Edited by Rance, H.F., “*Handbook of paper science*”, 1^a ed. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, Vol. 2, cap. 9, 175-282 (1982).
- [5] Danielsen, R. and Steenberg, B., “Quantitative Determination of Fibre Orientation in Paper” *Svenske Papperstidning* 50, 301-305 (1947).
- [6] Prusas, Z.C., “Laboratory Study of the Effects of Fiber Orientation on Sheet Anisotropy”, *TAPPI* 46, 5, 325-330 (1963).
- [7] Koran, Z., Silvy, J., Prud'homme, R., “Network Structure and Fiber Orientation in Paper”, *TAPPI Journal* 69, 5, 126-128 (1986).
- [8] Silvy, J., “Wood Processing and Utilization: The Physical Properties of Micro- and Macro-Structures”, published by Ellis Horwood Ltd., Chapter 14, 119-126 (1989).
- [9] Silvy, J., Herve, Ph., “Formation de la Feuille: Influence de la Flocculation, de la Longueur et de la Courbure des Fibras et les Proprietés Physiques des Papiers”, *Revue ATIP* 36, 6-7, 343-357, (1982).
- [10] Dodson, C.T.J., Fekih, H., “The Effect of Fibre Orientation on Paper Formation”, *Journal of Pulp and Paper Science* 17, 6, J203-J205 (1991).
- [11] Dodson, C.T.J., Schaffnit, C., “Flocculation and Orientation Effects on Paper-Formation Statistics”, *TAPPI Journal*, 167-171, January (1992).

- [12] Silvy, J., “The Equivalent Pore: a New Representation of the Structure of paper for the Study of its Physical and Reological Properties”, *International Paper Physics Conference, CPPA-TAPPI*. Canadá, 49-51 (1971).
- [13] Silvy, J., Caret, C., Belamaalem, B., Mahrous, M., “The Three-Dimensional Structure of Paper: Methods of Analysis and Implications on his Physical Properties”, *International Paper Physics Conference*, 91-95 (1995).
- [14] Lim, Y.W., Sarko, A., Marchessault, R.H., “Light Scattering by Celulose. II-Oriented Condenser Paper”, *TAPPI* **53**, 12, 2314-2319 (1970).
- [15] Attenborough, K., “The Influence of Microstructure on Propagation in Porous Fibrous Absorbents”, *J. Sound Vib.* **16**, 3, 419-442 (1971).
- [16] Page, D.H., El-Hosseiny, F., Winkler, K., Bain, R., “The Mechanical Properties of Single Wood-Pulp Fibres. Part I:A new Approach”, *Pulp and Paper Magazine of Canada* **73**, 8, 72-77 (1972).
- [17] Ault, H.K., Hoffman, A.H., Grigg, P., “A Method for Determining Fiber Direction in Soft Tissues”, *IEEE*. CH 2666-6/88, 230-233 (1988).
- [18] Pereira, M.J., Costa, A. P., Salvado, R., Silvy, J., Fiadeiro, P.T., “Structure of Paper and Non-Wovens”, *Materiais* **99**, (1999).
- [19] Silvy, J., “Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard: Silvy’s Orientation an Segment Lenght Distribution Method (The Equivalent Pore)”, editor Richard Mark, *Marvel Dekker Inc.* New York and Basel, 306-311 (1985).
- [20] Vinatier, J., Silvy, J., “Étude satistique de fonctions de repartition des fibres dans des materiaux du type papier et tissu non tissé”, *Revue ATIP*, **29**, 133 (1975).
- [21] Silvy, J., Lebreton, P., Butel, M., “Influence da la Difference des Vitesses du Jet de Pate et da la Toile de la Machine sur les Caracteristiques Physiques du Papier”, *Doc. FCI École Française de Papeterie, IRFIP SE*, **92**, 46, Grenoble (1976).
- [22] Underwood, E.E., “Quantitative Stereology”, Addison Wesley Publishing Company, Reading Masschusetts, 25-32 (1970).
- [23] Silvy, J., “A análise estrutural aplicada à caracterização de materiais porosos”, Seminário do Departamento de Ciência e Tecnologia do Papel, Universidade da Beira Interior, 14 e 15 de Novembro (2000).
- [24] Mignot, L., “Effect of micro-scale fiber orientation on macro scale paper properties development of fiber orientation measurement methods by image analysis”, Diplôme de Recherche Technologique-Spécilaité: Génie des Procédés, Institut National et Polytechnique de Grenoble, Nippon Paper Industries Ltd, Central Research Laboratory (1998).
- [25] Kallmes, O., “Technique for Determining the Fiber Orientation Distribution Througout the Thickness of a Sheet”, *TAPPI*, **52**, 3, 482-585 (1969).

- [26] Kallmes, O., Corte, H., “The Structure of Paper”, *TAPPI*, **43**, 9, 737-752 (1960).
- [27] Scharcanski, J., Dodson, C.T.J., “Local Spatial Anisotropy and its Variability”, *Journal of Pulp and Paper Science*, **25**, 11, 393-397 (1999).
- [28] Silvy, J., Butel, M., “High Resolution Fibre Orientation and Basis Weight Measurement”, *International Paper Physics Conference*, 87-90 (1995).
- [29] Pereira, M.J., Salvado, L.R., Silvy, J., Fiadeiro, P.T., “3-D structure characterisation of the nonwoven fabrics by means of an optical method” *Proceedings of Fiber Society-Spring 2000 Meeting*, 155-158 (2000).

Capítulo 4

Teoria da Interferência e da Difracção

4.1 Introdução

Os fenómenos observados na sobreposição de dois feixes de luz são análogos aos observados na sobreposição de duas ondas à superfície da água. Embora actualmente a concepção de que a luz possui características ondulatórias seja um dado adquirido nem sempre assim foi existindo um largo período de tempo durante o qual a natureza ondulatória da luz não foi aceite [1-5].

A teoria ondulatória da luz foi desenvolvida por Huygens em 1678, em contraponto à teoria corpuscular de Newton. Durante muito tempo foi esta segunda visão da luz que predominou. No princípio do século XIX, Young e Fresnel deram um novo impulso à teoria ondulatória da luz com as suas experiências de interferência e difracção, fazendo com que a teoria ondulatória fosse aceite, embora com muitas reticências [1-4]. A rejeição da teoria corpuscular de Newton só se deu totalmente com a determinação da velocidade de propagação da luz por Foucault, o qual verificou que a velocidade da luz apresentava diferentes valores para diferentes materiais sendo o seu valor máximo atingido para o vazio [1-4]. Esta constatação ia contra a teoria corpuscular que requeria que a velocidade da luz em meios mais densos fosse superior à velocidade da luz no vazio para poder explicar o fenómeno da refracção.

O problema da não aceitação da natureza ondulatória da luz era devido em grande parte ao facto de, à escala de trabalho normal, os efeitos correspondentes às propriedades das ondas não serem observados. A justificação para a não observação da natureza ondulatória da luz reside no facto de as dimensões dos comprimentos de onda associados à luz serem muito pequenos. A luz corresponde à região visível do espectro electromagnético compreendida entre as frequências 3.84×10^{14} Hz e

7.69×10^{14} Hz, o que em termos de comprimento de onda corresponde a uma região que vai de 390×10^{-9} m até 780×10^{-9} m.

Assim, um objecto por muito pequeno que seja bloqueia completamente uma onda luminosa. Um objecto cujas dimensões sejam da ordem de uma centena de comprimentos de onda (suficiente para bloquear qualquer onda luminosa) ainda é demasiado pequeno para poder ser observado à vista desarmada. Portanto o problema era de escala.

De acordo com a teoria ondulatória, a luz “contorna” os obstáculos que se lhe deparam, existindo por isso luz na região onde só deveria existir a sombra do objecto [4-8]. Este efeito é devido a um fenómeno denominado de difracção da luz. Existe ainda um outro fenómeno que resulta da sobreposição de algumas ondas luminosas que é denominado de interferência da luz. Muitas vezes não se é capaz de distinguir entre difracção e interferência da luz, chegando mesmo a existir alguma confusão na aplicação destes dois termos. A interferência envolve a produção deliberada de dois ou mais feixes luminosos em separado, enquanto que a difracção ocorre naturalmente quando de alguma forma se limita uma frente de onda.

Na formulação do problema da difracção considera-se essencialmente uma onda no espaço, cuja propagação é interrompida por um obstáculo ou máscara, que lhe altera localmente a sua amplitude e/ou fase por um factor bem determinado.

O princípio de Huygens descreve de um modo muito satisfatório e simples o fenómeno da difracção da luz fazendo a aproximação de que a amplitude e a fase de uma onda electromagnética pode ser descrita adequadamente através de uma variável escalar [1-12]. Esta aproximação é denominada aproximação escalar da onda. É com base nesta aproximação que se vai desenvolver este capítulo sobre a teoria da interferência e da difracção da luz.

A secção 4.2 apresenta e descreve as condições gerais para a ocorrência de interferência. O princípio de Huygens, a experiência de Young, e a difracção de Fraunhofer para as várias aberturas: fendas, aberturas rectangulares, circulares e elípticas e objectos de fase, estão descritos na secção 4.3. Dentro da secção respeitante à difracção por objectos de fase, apresenta-se a simulação do efeito produzido pela transmissão de luz através das réplicas, por forma a demonstrar a equivalência entre a modelização da estrutura do papel de acordo com o modelo do poro equivalente e com os padrões de difracção de réplicas da superfície do papel. Na secção 4.4 faz uma breve apresentação da relação entre a difracção de Fraunhofer e as Transformadas de Fourier. A finalizar, a secção 4.5 inclui um breve resumo deste capítulo.

4.2 Condições gerais

A luz pode ser representada fundamentalmente de duas formas, através da teoria corpuscular ou através da teoria ondulatória. A forma mais simples de representar a luz resulta da teoria corpuscular segundo a qual a luz é representada através de raios luminosos rectilíneos (domínio da óptica geométrica). No entanto, quando não se pode desprezar o comprimento de onda da luz por este ser de dimensões comparáveis às dimensões do sistema, é necessário ter em conta a natureza ondulatória da luz passando esta a ser representada através de ondas. Este é o domínio da óptica física.

A característica essencial de uma onda é a sua não localização. Do ponto de vista clássico a propagação de uma onda através de um meio consiste numa perturbação ψ que se propaga nesse meio transportando energia e momento.

As ondas mais familiares e de mais fácil visualização são as ondas mecânicas, nomeadamente as ondas em cordas, as ondas superficiais em líquidos, as ondas em molas e as ondas sonoras no ar. As ondas sonoras são longitudinais, isto é, o meio sofre uma perturbação na direcção de propagação da onda enquanto que as ondas em cordas são transversais nas quais a perturbação sofrida pelo meio se realiza numa direcção perpendicular à direcção de propagação da onda. Existem então dois tipos de ondas, as ondas longitudinais e as ondas transversais.

Para ambos os casos, embora a energia transportada pela onda se propague com a onda, o meio material onde a onda se propaga permanece na sua região de equilíbrio. Para as ondas não existe transporte de meio material. Esta característica das ondas distingue-as claramente de um fluxo de partículas.

A propagação de uma onda num meio é descrita matematicamente através de uma equação diferencial, que é função da posição e do tempo e que se denomina de equação de onda. A forma mais geral da equação de onda a uma dimensão, é obtida a partir da condição de que qualquer solução da equação de onda tem de se propagar numa dada direcção, com velocidade constante, sem variação da sua forma ao longo do tempo relativamente a um sistema de eixos que se desloque com a mesma velocidade [1,2,4,9].

Assim, uma onda que se propaga segundo a direcção do eixo dos xx , no sentido positivo ou negativo, é descrita através da equação

$$\psi(x,t) = f(x \mp vt) \quad (4-1)$$

onde f representa uma função diferenciável e onde t , x e v representam o tempo, a direcção e a velocidade de propagação da onda respectivamente, indicando o sinal negativo que a onda se desloca no sentido positivo do eixo dos xx enquanto que o sinal positivo indica a situação oposta.

A equação de onda diferencial a uma dimensão é dada pela equação

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}. \quad (4-2)$$

A forma de onda mais simples é aquela cujo perfil é uma curva seno ou coseno, conhecidas como ondas harmónicas, sendo dada pela equação

$$\psi = A \text{sen}[k(x \mp vt) + \varepsilon], \quad (4-3)$$

onde A e k são constantes representando a amplitude e a constante de propagação da onda, podendo variar sem que provoquem alteração no carácter harmónico da onda. ε é a fase inicial da onda. Ao argumento da função seno chama-se fase da onda e representa-se por ϕ .

As ondas em seno ou coseno são periódicas, representando pulsos regulares que se repetem infinitamente. A única diferença que existe entre a utilização de um função seno ou de uma função coseno na representação da forma de uma onda reside no facto de uma estar adiantada ou atrasada relativamente à outra de $\pi/2$ radianos (90°). Devido à sua periodicidade, a forma de uma onda repete-se sempre que exista um desvio de um múltiplo inteiro do comprimento de onda (λ) em todos os seus pontos. Matematicamente esta situação pode ser expressa através da seguinte equação

$$\psi = A \text{sen}\{k[(x + \lambda) - vt] + \varepsilon\}, \quad (4-4)$$

onde λ representa o comprimento de onda ou o período espacial. A relação entre o comprimento de onda e a constante de propagação é dada através da seguinte equação:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (4-5)$$

Alternativamente, se a onda for observada para uma posição fixa, ela repete-se sempre que exista uma diferença no tempo de um múltiplo do período temporal T para todos os pontos. Neste caso a equação para a onda é dada por

$$\psi = A \text{sen}\{k[x - v(t + T)] + \varepsilon\} \quad (4-6)$$

obtendo-se assim uma relação para a velocidade de propagação da onda em função do comprimento de onda, dada por

$$v = \lambda \nu, \quad (4-7)$$

sendo $\nu = 1/T$ a frequência temporal da onda. Outras quantidades muito utilizadas no movimento ondulatório são a frequência angular temporal (ω) dada pela equação $\omega = 2\pi\nu$ e o número de onda (κ), dado pela equação $\kappa = 1/\lambda$. Todas as quantidades que foram mencionadas são igualmente aplicáveis a ondas não harmónicas mas periódicas.

Utilizando as definições anteriores pode exprimir-se uma onda harmónica, a propagar-se num dado meio, através das equações:

$$\psi = A \text{sen}[k(x \mp vt) + \varepsilon] \quad (4-8)$$

$$\psi = A \text{sen}[(\kappa x \mp \omega t) + \varepsilon] \quad (4-9)$$

que são as mais utilizadas na representação de uma onda. Estas ondas são ondas ideais variando de $-\infty$ até $+\infty$ com uma única frequência constante, portanto com um único comprimento de onda, ou seja monocromáticas. Na prática não se verifica isto, as ondas reais não são monocromáticas sendo compostas por mais do que um comprimento de onda.

A velocidade de fase de uma onda é dada pela razão entre a frequência angular e a constante de propagação. Qualquer ponto de uma onda harmónica cuja amplitude seja constante move-se por forma a que a fase se mantenha constante no tempo. É o que acontece no caso das ondas circulares geradas na superfície de um líquido, para as quais os círculos concêntricos representam curvas onde a fase se mantém constante no tempo, para todos os seus pontos.

No caso de existirem duas funções de onda ψ_1 e ψ_2 que sejam ambas soluções da equação de onda, a função de onda resultante da adição dessas duas funções de onda é também solução da equação de onda. Este facto é conhecido como princípio da sobreposição e significa que quando duas perturbações individuais atingem um mesmo ponto do espaço elas sobrepõem-se, adicionando-se ou subtraindo-se uma à outra, sem que o seu movimento seja afectado [1-12]. Para duas funções de onda com amplitudes semelhantes o resultado da sobreposição variará, dependendo da diferença de fase entre elas, entre um valor máximo no caso de as duas funções de onda estarem em fase e um valor mínimo para a situação de oposição de fase [1-12]. Este fenómeno é chamado de interferência.

Até aqui só foram referenciadas as funções de onda unidimensionais. No entanto a situação mais geral é a existência de ondas tridimensionais definidas por uma equação de onda também tridimensional que é função de x , y , e z (em coordenadas rectangulares). A equação de onda tridimensional é uma generalização da equação 4-2 a uma dimensão e é dada por:

$$\nabla^2 \psi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (4-10)$$

onde ∇ representa o operador Laplaciano. As ondas tridimensionais podem ser divididas em três grupos principais: as ondas planas, as ondas esféricas e as ondas cilíndricas. As ondas planas são o caso mais simples de uma onda tridimensional. Existem quando todas as superfícies, onde a perturbação apresenta fase constante, formam um conjunto de planos perpendiculares à direcção de propagação (ver figura 4-1(a)) [1-3,9,12]. Os feixes de luz laser colimados são um exemplo de uma frente de onda plana a propagar-se no espaço. A expressão matemática para uma onda plana perpendicular a um dado vector \vec{k} (vector de propagação), que passa por um ponto genérico r de coordenadas (x_0, y_0, z_0) , é $\vec{k} \cdot \vec{r} = \text{const}$. Assim, a função de onda para uma onda plana harmónica a propagar-se no espaço é dada por

$$\psi(r, t) = A e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \epsilon)} \quad (4-11)$$

onde A , ω e k são constantes, que conforme já foi referido representam a amplitude, a frequência angular e a constante de propagação da onda, respectivamente. À medida que esta perturbação se

propaga ao longo da direcção \vec{k} , possui para cada ponto do espaço e do tempo uma dada fase. Para um dado tempo, as superfícies que unem todos os pontos de igual fase são conhecidas como frente de ondas. Se a amplitude A for constante em todos os pontos, a função de onda assumirá o mesmo valor em toda essa frente de onda. No caso mais geral como A é função da posição, a amplitude não é constante em toda a frente de onda e a onda deixa de ser homogénea.

A importância das ondas planas em óptica advém em primeiro lugar da facilidade com que se podem gerar e em segundo lugar porque qualquer onda tridimensional pode ser expressa como uma combinação de ondas planas com amplitudes e direcções de propagação distintas [1].

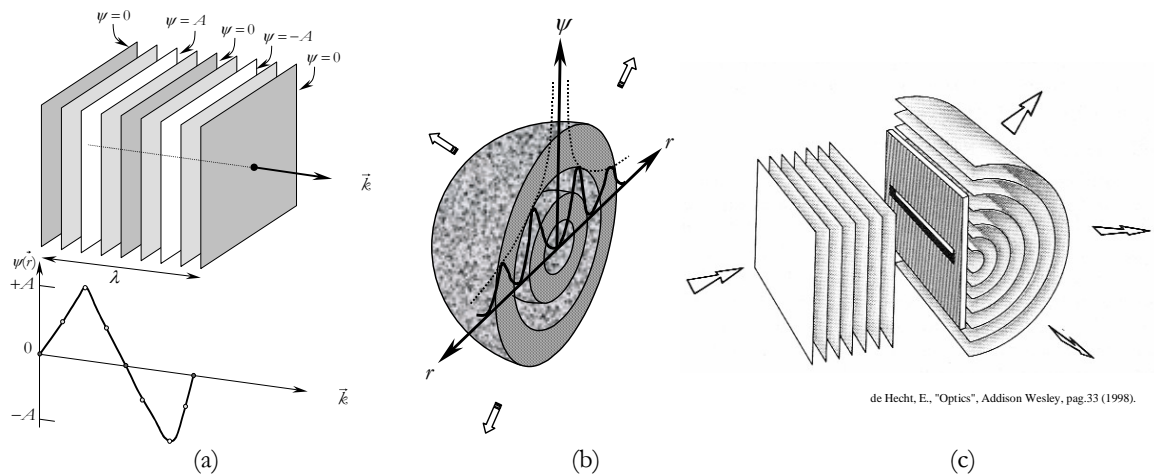


Figura 4- 1 Representação esquemáticas das ondas tridimensionais planas (a), esféricas (b) e cilíndricas (c).

Relativamente às ondas esféricas elas são constituídas por um conjunto de esferas concêntricas que aumentam de diâmetro à medida que se expandem no espaço (ver figura 4-1(b)). Este tipo de ondas são descritas, por questões de conveniência, em termos de coordenadas esféricas. A função de onda para ondas tridimensionais esféricas tem a forma

$$\psi(r, t) = \left(\frac{A}{r}\right) e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r} + \omega t + \varepsilon)} \quad (4- 12)$$

onde A é uma constante que representa a intensidade da fonte. Devido ao factor $1/r$ as ondas esféricas diminuem de amplitude alterando o seu perfil à medida que se expandem no espaço.

O terceiro tipo de ondas tridimensionais são as ondas cilíndricas. Quando se faz incidir uma frente de onda plana num alvo plano opaco contendo uma fenda fina e suficientemente longa obtém-se uma perturbação sob a forma de uma onda cilíndrica (na figura 4-1(c)). Neste caso o fenómeno é descrito em termos de coordenadas cilíndricas. A função de onda para as ondas cilíndricas apresenta a seguinte forma

$$\psi(r, t) \approx \left(\frac{A}{\sqrt{r}}\right) e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r} + \omega t + \varepsilon)} \quad (4- 13)$$

A situação mais comum é a existência de várias ondas a atingirem um mesmo ponto ou a coexistirem ao longo de uma mesma direcção. É então necessário, de acordo com o princípio da sobreposição

mencionado anteriormente, calcular o efeito resultante da combinação dessas várias ondas. Tal como já foi referido, a perturbação resultante da sobreposição de várias ondas num determinado ponto é dada pela soma algébrica das várias ondas individuais. Duas situações podem ocorrer originando resultados completamente distintos: as ondas que se sobrepõem terem amplitudes e fases diferentes mas terem a mesma frequência ou então para além de poderem ter amplitudes e fases diferentes também terem frequências diferentes.

No primeiro caso da adição de ondas com a mesma frequência a propagarem-se na mesma direcção, resulta ainda uma onda harmónica com a mesma frequência das ondas constituintes mas com amplitude e fase diferentes [1,3,9]. A expressão geral para a perturbação global resultante da sobreposição de N perturbações é a seguinte

$$\psi(x, t) = A \text{sen}[\omega t + \alpha(x, \varepsilon)] \quad (4-14)$$

onde $\alpha(x, \varepsilon)$ representa a parte espacial da fase da perturbação resultante e que é dada por

$$\tan \alpha = \frac{\sum_{i=1}^N A_i \text{sen } \alpha_i}{\sum_{i=1}^N A_i \text{cos } \alpha_i} \quad (4-15)$$

e A representa a amplitude da perturbação resultante dada por:

$$A^2 = \sum_{i=1}^N A_i^2 + 2 \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N A_i^2 A_j^2 \text{cos}(\alpha_i - \alpha_j) \quad (4-16)$$

Se as fases das diversas perturbações forem aleatórias, a diferença de fase também é aleatória. Nesse caso a soma dos termos em coseno vai tender para zero à medida que N aumenta. Assim para fontes idênticas a amplitude da perturbação total será dada por $A^2 = \sum_{i=1}^N A_i^2 = N A_i^2$. O quadrado da amplitude de N fontes idênticas com fases aleatórias é igual à soma dos quadrados das amplitudes de cada uma das fontes.

Se pelo contrário as N fontes (idênticas) forem coerentes e em fase no ponto de observação, isto é $\alpha_i = \alpha_j$, a perturbação resultante será dada por $A^2 = (\sum_{i=1}^N A_i^2)^2 = N^2 A_i^2$. O resultado é que o quadrado da amplitude de N fontes coerentes idênticas com a mesma fase é igual a N^2 vezes a soma dos quadrados das amplitudes de cada uma das fontes.

Ainda na situação de as perturbações terem a mesma frequência mas propagarem-se em sentidos opostos a perturbação resultante é uma onda estacionária, em oposição a uma perturbação a propagarem-se, cujo perfil é constante no espaço e é dado por:

$$\psi(x, t) = 2A \text{sen } kx \text{cos } \omega t \quad (4-17)$$

nesse caso, a amplitude é igual a $2A \text{sen } kx$, variando harmonicamente com $\text{cos } \omega t$.

Outra situação, é a sobreposição de perturbações com amplitudes semelhantes mas com frequências diferentes. Neste caso a perturbação resultante deixa de ser harmónica sendo dada por:

$$\psi(x, t) = 2A(x, t) \cos(\bar{k}x - \bar{\omega}t) \cos(k_m x - \omega_m t) \quad (4-18)$$

onde $\bar{\omega}$ e \bar{k} representam a frequência angular média e a constante de propagação média respectivamente e ω_m e k_m representam a frequência de modulação e a constante de propagação de modulação, respectivamente. O efeito global é as perturbações de baixas frequências a servirem de envolvente modulando as perturbações de altas frequências. A perturbação resultante apresenta então o fenómeno de batimentos, sendo a frequência de batimento dupla da frequência de modulação da envolvente [1,9]. A velocidade de propagação das perturbações das altas frequências é a velocidade de fase enquanto que a velocidade de propagação da envolvente (perturbações das baixa frequência) é denominada velocidade de grupo.

No caso específico da luz sendo os campos eléctrico e magnético campos vectoriais, a luz é então um fenómeno vectorial. A perturbação resultante da sobreposição de ondas electromagnéticas pode ser expressa em função do campo eléctrico ou do campo magnético. Regra geral utiliza-se o campo eléctrico para variável, nas equações de onda, por ser mais simples de ser detectado.

De acordo com o princípio da sobreposição, a intensidade do campo eléctrico num ponto do espaço, resultante da interacção de vários campos eléctricos nesse ponto, é a soma algébrica das intensidades de todos os campos individuais actuantes num ponto. Como o campo eléctrico possui uma elevadíssima frequência de variação, da ordem dos 10^{14} Hz, não é possível ou é impraticável trabalhar-se com valores instantâneos do campo. Trabalha-se então com uma quantidade denominada de irradiância, que é proporcional à média no tempo do quadrado da intensidade do campo eléctrico. A irradiância é uma quantidade que tem a vantagem de poder ser medida directamente através de detectores específicos. Considerem-se então duas ondas da forma

$$\vec{E}_1(\vec{r}, t) = \vec{E}_{01} \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \omega t + \varepsilon_1) \quad (4-19)$$

$$\vec{E}_2(\vec{r}, t) = \vec{E}_{02} \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \omega t + \varepsilon_2) \quad (4-20)$$

onde \vec{k}_1 e \vec{k}_2 representam os vectores de propagação de cada uma das ondas, \vec{r} representa o vector de posição e ε_1 e ε_2 representam as fases iniciais de cada onda. Da definição da irradiância, vista anteriormente, resulta a seguinte expressão

$$I = \varepsilon_0 c \langle \vec{E}^2 \rangle_T. \quad (4-21)$$

A irradiância total resultante da sobreposição de duas ondas $\vec{E}_1(\vec{r}, t)$ e $\vec{E}_2(\vec{r}, t)$ é então dada por $I = I_1 + I_2 + I_{12}$, onde I_{12} é o termo de interferência dado por $I_{12} = 2 \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle_T$. Calculando este termo em função da diferença de fase global que resulta da diferença de percursos e de fases iniciais das duas ondas, obtém-se a expressão

$$I_{12} = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos \delta \quad (4-22)$$

Considerando que \vec{E}_{01} é paralelo a \vec{E}_{02} (que é a situação mais comum) o termo de interferência vem então dado por

$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (4-23)$$

onde $\delta = (\vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \varepsilon_1 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \varepsilon_2)$ é a diferença de fase global entre as duas ondas.

A irradiância total é então dada pela expressão

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta. \quad (4-24)$$

No caso de todas as ondas apresentarem amplitudes iguais a I_0 , a expressão anterior reduz a

$$I = 2I_0(1 + \cos \delta) \quad (4-25)$$

ou ainda a

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2}. \quad (4-26)$$

Em conclusão pode afirmar-se que:

- Duas ondas ortogonais linearmente polarizadas não interferem, uma vez que $I_{12} = 0$ (equação 4-22).
- A irradiância máxima é obtida quando $\cos \delta = 1$, isto é quando $\delta = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi \dots$ ou seja quando as duas ondas estão em fase. Esta é a condição de interferência totalmente constructiva.
- A irradiância mínima é obtida quando $\cos \delta = -1$. Neste caso $\delta = \pm\pi, \pm 3\pi \pm 5\pi \dots$ e as duas ondas estão em oposição de fase. É a condição de interferência totalmente destrutiva.
- Quando $0 < \cos \delta < 1$ as ondas estão desfazadas entre 0° e 90° resultando a condição de interferência constructiva $I_1 + I_2 < I < I_{\max}$.
- Quando $0 > \cos \delta > -1$ as ondas estão desfazadas entre 90° e 180° resultando a condição de interferência destrutiva, $I_1 + I_2 > I > I_{\min}$.
- Quando $\cos \delta = 0$ as ondas estão desfazadas de 90° , que é a situação de quadratura onde $I = I_1 + I_2$.

Para finalizar esta secção que se reveste de maior importância para o estudo dos fenómenos de interferência e difracção, deve ter-se em mente que:

- Para que dois feixes luminosos produzam um padrão estável de interferência, devem ter aproximadamente a mesma frequência, caso contrário existirão variações na diferença de fase extremamente rápidas, o que origina que o valor médio do termo de interferência seja zero durante o intervalo de detecção.

- Para que um padrão de franjas possa ser observado não é necessário que as duas fontes estejam em fase uma com a outra mas que a diferença de fase entre elas permaneça constante, isto é, que as duas fontes tenham coerência espacial.

4.3 Interferência e difracção

4.3.1 Princípio de Huygens

Quando uma fonte pontual projecta a sombra de um objecto num alvo, seria de esperar que essa sombra fosse bem definida, de acordo com a teoria corpuscular da luz. No entanto, como referido anteriormente, devido à natureza ondulatória da luz, se for examinada cuidadosamente essa sombra verifica-se que tal não acontece existindo nas arestas de separação entre luz e sombra zonas de luz e zonas de sombra. Este efeito é originado pela deflexão de uma certa quantidade de luz para dentro da zona de sombra (ver figura 4-2(a)).

Para explicar este “curvar” da luz, Huygens propôs um princípio segundo o qual cada ponto de uma frente de onda em propagação actua como uma fonte de ondas secundárias esféricas, que se propagam com a mesma velocidade da onda original e cuja envolvente, após algum tempo, constitui uma nova frente de onda (figura 4-2(b) e (c)).

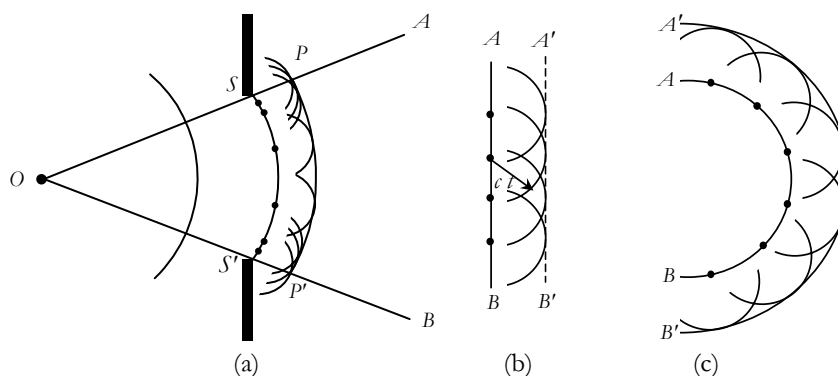


Figura 4- 2 Representação esquemática do princípio de Huygens.

O princípio de Huygens é particularmente útil quando as ondas incidem num obstáculo e as suas frentes de onda são parcialmente bloqueadas. Para estes casos, Huygens demonstrou que as ondas contornam o obstáculo justapondo-se à zona de sombra [4-8]. Este contornar do obstáculo é conhecido como difracção. Na figura 4-3 apresentam-se três situações demonstrativas do princípio de Huygens: para uma aresta, para uma abertura de grandes dimensões e para uma abertura de dimensões muito reduzidas, comparável ao comprimento de onda da radiação.

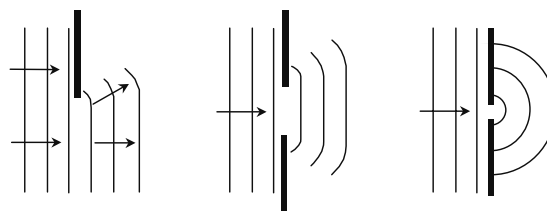


Figura 4- 3 Princípio de Huygens para uma frente de onda obstruída.

Estes efeitos podem ser observados facilmente numa tina de água bloqueando a frente de onda de acordo com os exemplos apresentados na figura 4-3.

A difracção pode ser dividida em dois tipos, a difracção de Fraunhofer e a difracção de Fresnel. A primeira ocorre quando a fonte e o alvo estão suficientemente separados do obstáculo ou da abertura, podendo as frentes de onda serem consideradas como planas (difracção de campo longínquo), a segunda ocorre quando a fonte ou o alvo, ou ambos, estão próximos do obstáculo ou da abertura. Neste caso as frentes de onda são esféricas e estamos na situação de difracção de campo próximo.

As figuras ou padrões resultantes da difracção observados num alvo, ou captados com um detector, são chamados padrões de difracção e representam uma distribuição da intensidade da luz para vários ângulos de observação. A observação desta distribuição da intensidade da luz num alvo revela maior intensidade na direcção de avanço da frente de onda e uma diminuição à medida que o ângulo de observação aumenta.

4.3.2 Experiência de Young

Desde que Huygens propôs a sua teoria ondulatória da luz em 1678 e até que surgiu uma evidência clara da natureza ondulatória da luz mais de um século se passou. Thomas Young em 1802 foi quem pela primeira vez realizou uma tal demonstração, da natureza ondulatória da luz. Nessa experiência, apresentada esquematicamente na figura 4-4(a), Young utilizou duas aberturas que deixavam passar dois feixes de uma frente de onda plana e monocromática incidente nas referidas aberturas. Esses dois feixes sobrepunham-se e interferiam originando zonas com luz e sem luz que podiam ser visíveis num alvo [1-12].

Tendo em atenção a figura 4-4(b) e considerando-se que o ponto P está suficientemente longe das duas aberturas S_1 e S_2 , e que a sua distância ao alvo é muito maior que a separação entre as aberturas, a diferença entre as distâncias S_1P e S_2P é igual ao segmento Δ na figura. Como o alvo se encontra a grande distância das aberturas, o arco S_1Q pode ser aproximado a um segmento de recta. Desta forma, o comprimento do segmento Δ pode ser calculado com base no triângulo rectângulo S_1S_2Q (ver figura 4.4(a)). Se θ for o ângulo entre o plano das aberturas e o segmento S_1Q então Δ é dado por

$$\Delta = a \text{ sen } \theta \quad (4- 27)$$

onde a representa a separação entre os centros das duas aberturas.

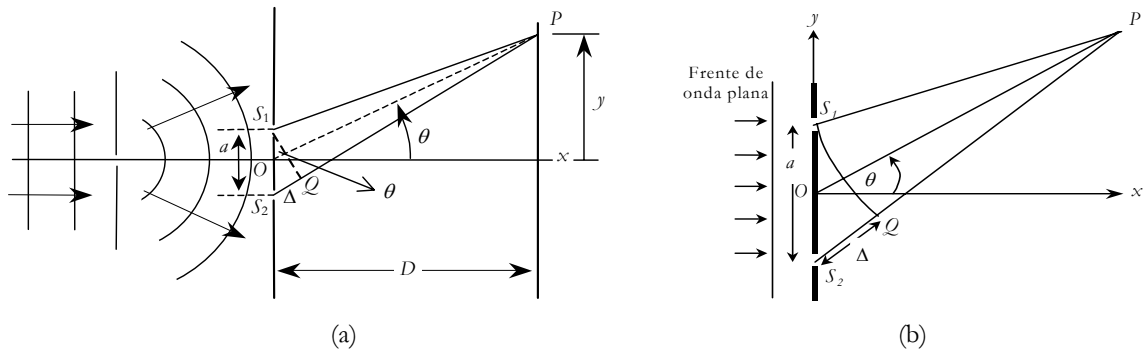


Figura 4- 4 Representação esquemática da experiência de Young

Ainda dentro da mesma aproximação, θ pode ser visto como o ângulo entre o eixo óptico Ox e o segmento de recta que vai desde o ponto médio entre as duas aberturas ao ponto P . Assim e dentro das aproximações efectuadas a condição de interferência construtiva em P (frentes de onda em fase) ocorre quando

$$S_2P - S_1P = \Delta = m\lambda = a \text{ sen } \theta \quad (4- 28)$$

enquanto que a interferência destrutiva (frentes de onda em oposição de fase) ocorre quando

$$S_2P - S_1P = \Delta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda = a \text{ sen } \theta, \quad (4- 29)$$

onde m representa a ordem da interferência e pode tomar os valores zero ou um número inteiro. Como as duas frentes de onda são geradas a partir de um mesmo feixe têm a mesma fase inicial e as mesmas constantes de propagação. Assim, a diferença de fase entre as duas frentes de onda é devida só à diferença de percursos das duas frentes de onda para atingirem o ponto P . Então pode escrever-se que

$$\delta = k(r_1 - r_2) = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)\Delta, \quad (4- 30)$$

onde r_1 e r_2 são as distâncias entre S_1 e P e entre S_2 e P , respectivamente. Substituindo a equação 4-30 na equação 4-26 obtém-se

$$I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\pi ay}{\lambda D}\right) \quad (4- 31)$$

onde y representa a altura entre o eixo óptico e o ponto P e D representa a distância entre as duas aberturas e o alvo.

As posições de máximo de interferência ocorrem então para valores de y dados por

$$y_m = \frac{m\lambda D}{a}, \quad \text{com } m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (4- 32)$$

existindo uma separação constante entre máximos adjacentes dada por $\Delta y = \lambda D/a$. Os mínimos de irradiância estão situados nas posições intermédias entre os vários máximos consecutivos.

Das equações 4-28 e 4-29 pode inferir-se (excepto para o caso do máximo central) que a posição dos máximos e dos mínimos depende do comprimento de onda. Consequentemente, quando luz branca incide em duas aberturas, tal como na experiência de Young, o máximo central apresenta cor branca mas os máximos de ordem superior apresentam colorações semelhantes a pequenos arco-íris. Desta forma, Young tornou-se o primeiro a determinar os comprimentos de onda da luz visível e mostrou o que distingue fisicamente as diferentes cores é o seu comprimento de onda, estando de acordo ao que Grimaldi tinha pensado em 1665 [5].

Ainda relativamente à experiência de Young, a condição de que a distância entre o alvo e o plano das aberturas tem de ser suficientemente grande (para que possamos afirmar que $\Delta = a \sin \theta$) é uma condição fundamental. Esta condição, é equivalente à condição de que a fase de qualquer onda elementar proveniente do anteparo é função linear da distância no plano do anteparo [4]. Esta é a condição para a existência da difracção de Fraunhofer da qual a interferência produzida por duas aberturas é um caso especial.

4.3.3 Difracção de Fraunhofer e de Fresnel

Considere-se a situação na qual uma fonte pontual distante ilumina uma pequena abertura e que a observação é feita num alvo próximo. Nestas condições, a imagem projectada no alvo é praticamente igual à abertura apresentando no entanto algumas franjas na sua periferia. Afastando-se um pouco mais o alvo, a imagem observada no alvo continua a ser reconhecível como sendo a abertura original embora as franjas observadas na sua periferia se apresentem melhor estruturadas e sejam mais visíveis. Este fenómeno é conhecido como difracção de Fresnel ou de campo próximo. Caso o plano de observação se encontre muito afastado da abertura já não é possível reconhecerem-se as formas do objecto original observando-se um padrão de franjas que cobre uma vasta região do alvo. Aumentando ainda mais a distância, observa-se uma variação nas dimensões do padrão observado e não na sua forma (ver figura 4-5). Esta situação corresponde à difracção de Fraunhofer ou de campo longínquo. Uma ilustração da transição entre a difracção de Fresnel e a difracção de Fraunhofer é apresentada na figura 4-5 para o caso de uma fenda simples.

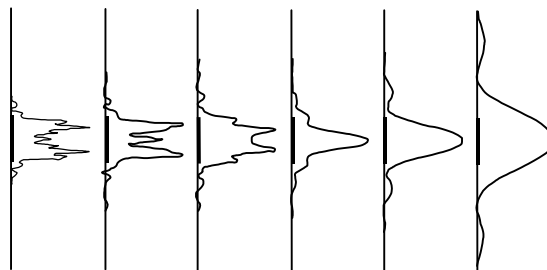


Figura 4- 5 Transição da difracção de Fresnel para a difracção de Fraunhofer.

A fase de cada contribuição num ponto do espaço, devida às diferenças de percursos ópticos, é extremamente importante para a determinação do campo resultante. Quando as frentes de onda são

praticamente planas, as diferenças de percursos podem ser descritas através de uma função linear das duas variáveis da abertura. Esta linearidade nas variáveis da abertura caracteriza matematicamente o regime de difração de Fraunhofer [1,4]. A difração de Fresnel prevalece no entanto sempre que a fonte, o ponto de observação ou ambos se encontrem tão próximos da abertura de tal forma que a curvatura das frentes de onda já não possa ser desprezada [1,4,9].

Para se determinar as fases relativas das contribuições dos elementos da abertura relativamente a um determinado ponto de observação P , é necessário definir-se a posição de todos os pontos equidistantes desse ponto (ver figura 4-6(a)). Se o ponto de observação se encontrar num plano situado a uma distância inferior a R , não se podem utilizar superfícies planas como referência mas antes superfícies esféricas. Se pelo contrário o ponto P pertencer a um plano situado a uma distância superior a R , de tal modo que o desvio máximo entre uma frente de onda esférica e uma frente de onda plana (Δ) seja inferior a $\lambda/8$, a diferença entre a esfera e o plano deixa de ser importante e as superfícies podem ser consideradas como planas. O mesmo se passa relativamente à separação entre a fonte de luz e a abertura. Se a fonte de luz se encontrar num plano situado a uma distância inferior a R , as frentes de onda são esféricas enquanto que se a fonte encontrar a uma distância superior a R as frentes de onda podem ser consideradas planas (ver figura 4.6(b)). A distância R que divide os dois regimes é conhecida como distância de Rayleigh e é dada por:

$$R = \frac{b^2}{\lambda} \quad (4- 33)$$

onde b representa a largura da abertura, neste caso uma fenda, λ representa o comprimento de onda da radiação incidente e R é a menor das distâncias entre a fonte e a abertura e entre a abertura e o ponto de observação.

Assim, podem estabelecer-se as seguintes condições para a ocorrência da difração de Fraunhofer ou de Fresnel:

Difração de Fraunhofer : $b^2 < \lambda R$

Difração de Fresnel : $b^2 \geq \lambda R$

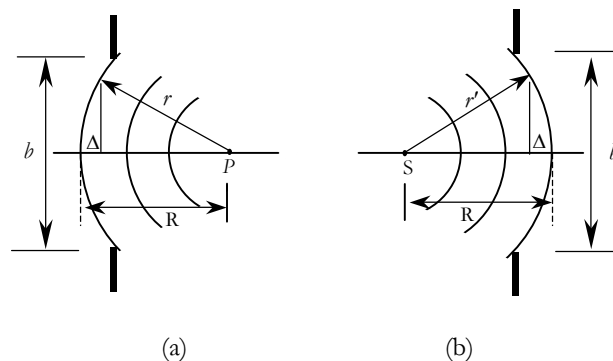


Figura 4- 6 Desvio entre uma frente de onda plana e uma frente de onda esférica para ondas difractadas (a) e incidentes (b).

A parte teórica associada à difracção de Fraunhofer é muito mais simples de ser tratada matematicamente do que a da difracção de Fresnel. Experimentalmente a difracção de Fraunhofer é de fácil visualização bastando para isso expandir e colimar um feixe de luz (geralmente laser) com lentes convergentes e focá-lo posteriormente num alvo com uma outra lente convergente colocada depois da abertura. Este tipo de montagem faz com que a fonte de luz e o alvo estejam efectivamente a uma distância infinita da abertura.

Nesta tese será considerada só a difracção de Fraunhofer por ser a que vai servir de base teórica à realização e compreensão da parte experimental. Serão apresentados e descritos os exemplos mais conhecidos da difracção de Fraunhofer, nomeadamente a difracção por uma fenda simples, por uma abertura rectangular (quadrada) e por aberturas circulares e elípticas. Será ainda apresentada e descrita a difracção por um objecto onde só existe variação de fase (objecto de fase).

4.3.3.1 Difracção por uma fenda simples

O caso mais simples de difracção é o que resulta de uma fenda simples de largura b iluminada por uma frente de onda plana com amplitude uniforme (ver figura 4-7). Considera-se que a fenda tem um comprimento L infinito suprimindo-se desta forma a possibilidade de existência de difracção por parte dos limites da fenda. O padrão de difracção resultante é devido unicamente à largura da fenda.

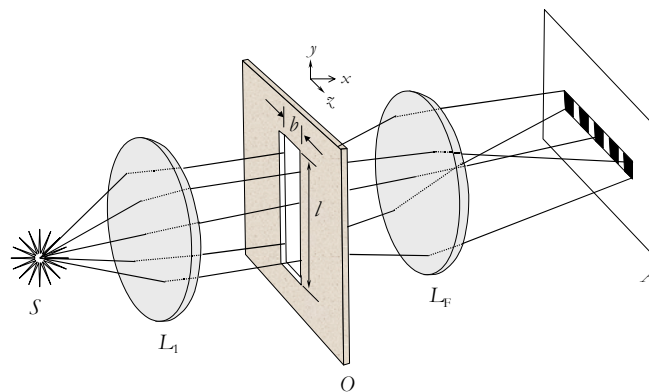


Figura 4-7 Esquema para geração do padrão de difracção de Fraunhofer por uma fenda simples num alvo.

O padrão de difracção de uma fenda simples é, de acordo com princípio de Huygens, o resultado da sobreposição de todas as ondas esféricas produzidas a partir de cada ponto que constitui a frente de onda plana incidente na fenda. Tal como apresentado na figura 4-8(a) as ondas que chegam ao ponto P estão desfasadas entre si devido aos seus diferentes percursos ópticos. Um raio que passe pelo centro da fenda e chegue ao ponto P tem um percurso óptico diferente do de um raio que passe pelas extremidades da fenda.

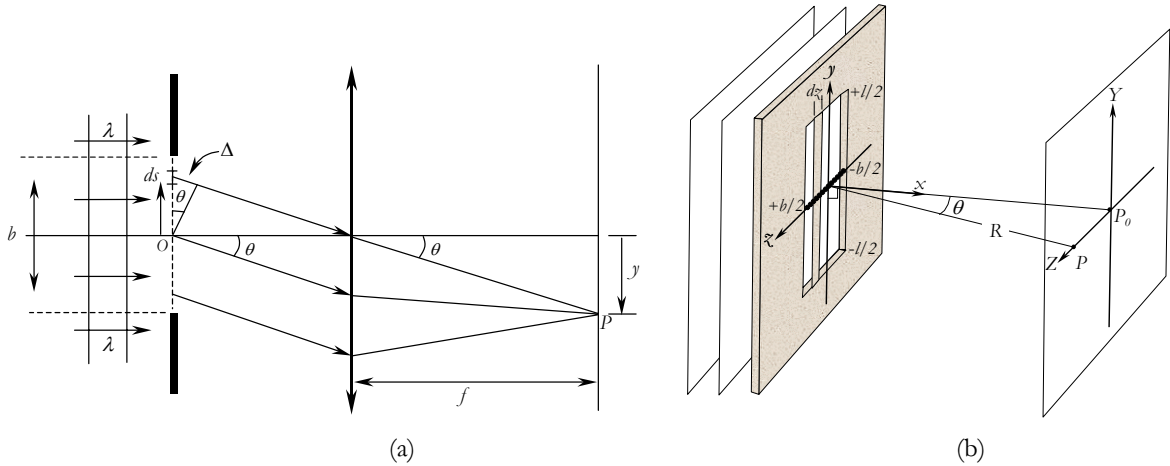


Figura 4- 8 Representação esquemática da geração do padrão de difração de Fraunhofer de uma fenda simples (a) e representação esquemática da abertura correspondente a uma fenda simples (b).

A frente de onda correspondente à largura da fenda representa um conjunto contínuo de fontes de ondas secundárias esféricas. Cada intervalo infinitesimal $d\xi$ (ver figura 4.8(b)) da frente de onda pode ser considerado como uma fonte de ondas secundárias esféricas que interferem no ponto P (ver figura 4-8(b)). As ondas que chegam ao ponto P , expressas em termos da variação do campo eléctrico, podem ser representadas por

$$dE_p = \left(\frac{dE_0}{R}\right) e^{i(kR - \omega t)}, \tag{4- 34}$$

onde R corresponde ao percurso óptico entre o intervalo $d\xi$ e o ponto P . Considerando que R_0 é o percurso óptico da onda secundária resultante do centro da fenda ($\xi = 0$), então qualquer outra onda proveniente de um intervalo $d\xi$ situado a uma altura r genérica do eixo óptico é dada pela expressão

$$dE_p = \left(\frac{dE_0}{R}\right) e^{i[k(R_0 + \Delta) - \omega t]}, \tag{4- 35}$$

onde Δ representa a diferença de percurso óptico em relação à onda originada no ponto $\xi = 0$. Para a amplitude, a diferença de percurso óptico não é importante uma vez que $\Delta \ll R_0$. No entanto, em relação à fase, como esta é extremamente sensível a pequenas variações, não se pode desprezar o factor Δ .

A amplitude das ondas depende da dimensão dos intervalos $d\xi$. Quando todas as contribuições são adicionadas por integração sobre a largura da fenda, obtém-se o efeito total em P . Assim, pode escrever-se que

$$dE_0 = E_L d\xi, \tag{4- 36}$$

onde E_L é a amplitude por unidade de largura da fenda a uma distância unitária. Por substituição na equação 4-35 e tendo em consideração que a diferença de percurso óptico é dada pela expressão 4-27, tem-se

$$dE_p = \left(\frac{E_L d\zeta}{R_0} \right) e^{i[kR_0 + k\zeta \text{sen } \theta - \omega t]}. \quad (4-37)$$

Integrando a equação anterior sobre a largura da fenda e separando a parte que representa a amplitude (entre parêntesis) da parte que representa a fase obtém-se

$$E_p = \left(\frac{E_L}{R_0} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} e^{ik\zeta \text{sen } \theta} d\zeta \right) e^{i(kR_0 - \omega t)} \quad (4-38)$$

donde

$$E_p = \frac{E_L}{R_0} \frac{1}{i k \text{sen } \theta} \left[e^{(ikb \text{sen } \theta)/2} - e^{-(ikb \text{sen } \theta)/2} \right] e^{i(kR_0 - \omega t)}. \quad (4-39)$$

Fazendo

$$\beta = \frac{1}{2} (kb \text{sen } \theta) \quad (4-40)$$

então

$$E_p = \frac{E_L b}{R_0} \text{sinc}(\beta) e^{i(kR_0 - \omega t)} \quad (4-41)$$

representa a onda resultante que é uma onda harmónica simples, cuja amplitude varia com a posição de P por meio de β . A quantidade β representa a diferença de fase entre ondas emitidas a partir do centro e das arestas da fenda. A quantidade física utilizada para a detecção da amplitude da onda resultante é, tal como referido na secção 4.2, a irradiância definida através da equação 4-21. Então a expressão que traduz a irradiância total é a seguinte

$$I = \varepsilon_0 c \langle E_p^2 \rangle = I_0 \text{sinc}^2(\beta) \quad (4-42)$$

onde I_0 inclui todos os factores constantes e é dado por $I_0 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c (E_L b / R_0)^2$. Através desta equação é possível traçar a variação da irradiância com a altura, em relação ao eixo óptico, no alvo.

A irradiância máxima I_0 ocorre quando a função $\text{sinc}(\beta)$ atinge o seu valor máximo, isto é, quando $\text{sinc}(\beta) = 1$ correspondendo a $\beta = 0$ o que da equação 4-40 leva a que $\theta = 0$. Portanto o ponto de máxima irradiância é o ponto central sendo o máximo que lhe corresponde denominado de máximo central ou de ordem zero. O máximo central representa o ponto em que todas as ondas secundárias têm a mesma fase. A partir deste ponto, a irradiância diminui até atingir um valor mínimo ($I = 0$) aumentando de seguida até atingir um valor máximo ao qual se segue um outro mínimo e assim sucessivamente para ambos os lados do ponto central. O padrão de difracção é simétrico relativamente ao ponto central.

Os mínimos de irradiância ocorrem nos pontos para os quais $\text{sinc}(\beta) = 0$, isto é, quando $\text{sen } \beta = 0$ ou seja quando $\beta = \pm\pi, \pm 2\pi, \pm 3\pi, \dots$. Da equação 4-40 resulta então que $\frac{1}{2} (kb \text{sen } \theta) = m\pi$, ou seja, $m\lambda = b \text{sen } \theta$. Mas como $\text{sen } \theta = y/f$ (aproximação de ângulos pequenos) os mínimos ocorrem para pontos no alvo onde

$$y \cong \frac{m\lambda f}{b} \quad \text{com } m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (4-43)$$

Os máximos secundários de irradiância não ocorrem exactamente a meia distância entre dois mínimos sucessivos, estando desviados em direcção ao máximo central do padrão de difracção de uma quantidade que diminui com o aumento de β [1]. Os máximos secundários do padrão de difracção coincidem com os máximos da função sinc, ou seja, ocorrem para pontos que satisfaçam a condição

$$\frac{d}{d\beta} \left(\frac{\text{sinc}\beta}{\beta} \right) = 0 \quad (4-44)$$

resolvendo a equação anterior obtém-se a equação não linear

$$\beta = \tan \beta. \quad (4-45)$$

Assim, os valores para ocorrência de máximos secundários são as soluções da equação 4.45, $\beta = \pm 1.43\pi, \pm 2.46\pi, \pm 3.47\pi$ e assim sucessivamente.

O padrão de difracção de Fraunhofer de uma fenda (figura 4-9(a)) apresenta então uma série de linhas perpendiculares à direcção do comprimento da fenda, conforme se pode observar na figura 4-9(b). Na figura 4-10 apresenta-se o perfil horizontal e a sua visualização 3-D do padrão de difracção da figura 4-9 (b). Se a fonte pontual fosse substituída por uma fonte linear incoerente o padrão de difracção alargava dando origem a uma série de bandas. Qualquer ponto da fonte linear gera um padrão de difracção independente.

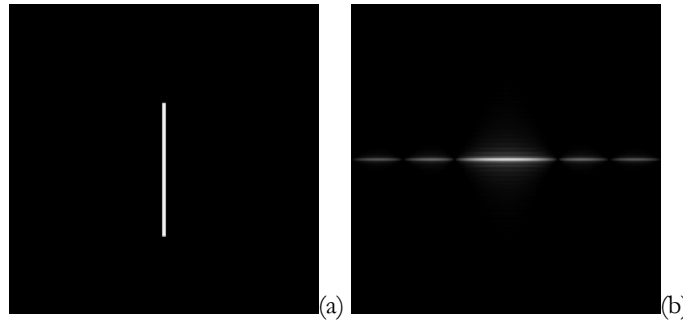


Figura 4- 9 Fenda simples (a) e o correspondente padrão de difracção de Fraunhofer (b).

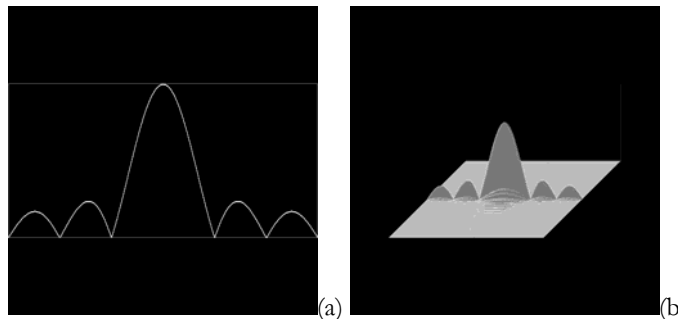


Figura 4- 10 Perfil horizontal do padrão de difracção de Fraunhofer de uma fenda simples (a) e visualização 3-D desse mesmo padrão de difracção de Fraunhofer (b).

As dimensões do padrão de difracção são inversamente proporcionais às dimensões da abertura (equação 4-43). À medida que a dimensão da abertura aumenta o padrão de difracção contrai-se até que no limite, para uma abertura de dimensões infinitas, o padrão de difracção reduz-se a um ponto sem dimensões, torna-se uma função delta.

Para o caso de uma fenda dupla (figura 4-11(a)), cada abertura gera no alvo um padrão de difracção típico de uma fenda simples os quais embora semelhantes em amplitude podem ter variações significativas de fase. Em qualquer ponto do alvo as contribuições das duas fendas sobrepõem-se e devido à coerência existente entre as ondas secundárias das duas aberturas vai ocorrer interferência (de Young para duas fendas) para além da difracção por uma fenda [1,3,6,9]. No caso da frente de onda plana incidir normalmente ao plano das fendas, as ondas secundárias são emitidas em fase, sendo o padrão de interferência num ponto particular determinado pelas diferenças de percursos ópticos entre as ondas emitidas pelas duas fendas. O padrão resultante é constituído pelo padrão de interferência de duas aberturas modulado pelo padrão de difracção de uma fenda (ver figura 4-11(b)). Na figura 4-12 apresenta-se o perfil horizontal e a sua visualização 3-D do padrão de difracção da figura 4-11(b).

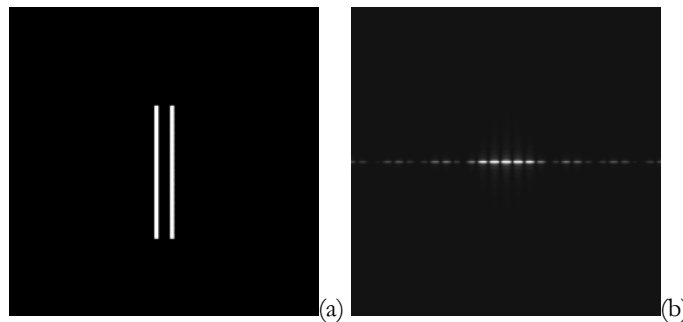


Figura 4- 11 Fenda dupla (a) e o correspondente padrão de difracção de Fraunhofer (b).

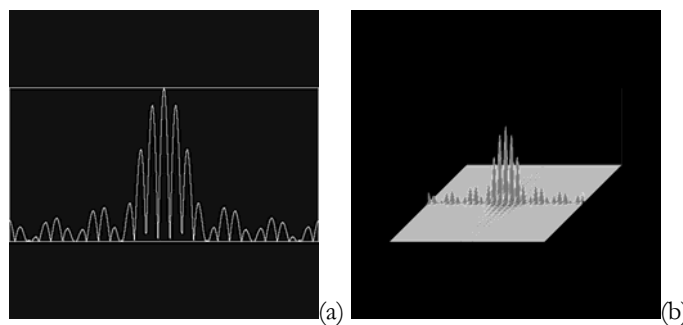


Figura 4- 12 Perfil horizontal do padrão de difracção de Fraunhofer de uma fenda dupla (a) e visualização 3-D desse mesmo padrão de difracção de Fraunhofer (a).

A expressão da irradiância para uma fenda dupla é obtida com base na análise da fenda simples efectuando-se ligeiras reformulações. Assim, e retornando à equação 4-38, a amplitude no caso da fenda dupla é dada por

$$E_p = \left(\frac{E_L}{R_0} \int_{-1/2(a+b)}^{-1/2(a-b)} e^{ik_z \text{sen} \theta} d\zeta + \frac{E_L}{R_0} \int_{1/2(a-b)}^{1/2(a+b)} e^{ik_z \text{sen} \theta} d\zeta \right) e^{i(kR_0 - \omega t)} \quad (4- 46)$$

onde a representa a separação entre fendas e b a largura das fendas. Resolvendo este integral e fazendo

$$\beta = \frac{1}{2}(kb \text{ sen } \theta) \quad (4-47)$$

$$\alpha = \frac{1}{2}(ka \text{ sen } \theta) \quad (4-48)$$

obtém-se

$$E_p = \frac{2E_L b}{R_0} \text{sinc}(\beta) \cos \alpha e^{i(kR_0 - \omega t)}. \quad (4-49)$$

Assim, a irradiância pode ser expressa por

$$I = 4I_0 \text{sinc}^2(\beta) \cos^2 \alpha, \quad (4-50)$$

onde I_0 é dado por

$$I_0 = \frac{\epsilon_0 c}{2} \left(\frac{E_L b}{R_0} \right)^2. \quad (4-51)$$

Os mínimos de difracção ocorrem quando $\beta = m\pi$, com $m = \pm 1, \pm 2, \dots$, ou em função de θ quando

$$b \text{ sen } \theta = m\lambda. \quad (4-52)$$

Os máximos de interferência ocorrem quando $\alpha = p\pi$, sendo $p = \pm 1, \pm 2, \dots$ ou seja quando

$$a \text{ sen } \theta = p\lambda. \quad (4-53)$$

Quando as duas condições anteriores são satisfeitas para o mesmo ponto, isto é, para o mesmo valor de θ , a franja correspondente ao máximo de interferência está ausente. A condição para a existência de ordens ausentes é obtida através da razão entre as condições de mínimo de difracção e de máximo de interferência, isto é, $a = (p/m)b$ ou ainda $\alpha = (p/m)\beta$.

Para o caso de N fendas (figura 4-13(a)), as equações utilizadas para duas fendas serão generalizadas efectuando-se a sua integração sobre N fendas. Então a irradiância final é dada pela seguinte expressão

$$I = I_0 \left(\frac{\text{sen } \beta}{\beta} \right)^2 \left(\frac{\text{sen } N\alpha}{\text{sen } \alpha} \right)^2. \quad (4-54)$$

O factor em β representa a envolvente do termo da difracção, enquanto que o factor em α descreve o termo de interferência entre fendas. O termo de interferência é constituído por máximos principais e secundários igualmente espaçados entre os quais existem pontos correspondentes aos mínimos de irradiância. O padrão global é o resultado do produto destes dois termos (ver figura 4-13(b)). Na figura 4-14 apresenta-se o perfil horizontal e a visualização tridimensional do padrão de difracção da figura 4-13(b).

Os máximos principais de interferência ocorrem sempre que o numerador e o denominador do termo de interferência da equação 4-54 tendem ao mesmo tempo para zero, isto é, quando $\alpha = 0, \pi, 2\pi, \dots$, enquanto que os mínimos de interferência (zeros de irradiância) ocorrem sempre que o numerador do termo de interferência da equação 4-54 seja zero e o denominador diferente de zero, isto é, sempre que

Não assumir os valores $0, \pi, 2\pi, \dots, p\pi$. Exceção para os casos em que p for igual a $0, N, 2N, \dots$, uma vez que para essas situações o numerador e o denominador assumem o valor zero obtendo-se então máximos principais de interferência.

Os máximos secundários ocorrem aproximadamente a meia distância entre dois mínimos, isto é, aproximadamente quando $\sin \theta = \pm \frac{1}{2} \frac{\lambda}{Nd}, \pm \frac{3}{2} \frac{\lambda}{Nd}, \dots$. A irradiância para esses máximos secundários é aproximadamente $\frac{1}{22}$ da irradiância dos máximos principais [1]. Entre dois máximos principais existem $N - 1$ mínimos igualmente espaçados separados por $N - 2$ máximos secundários. À medida que o número de fendas aumenta, o número de máximos secundários também aumenta fazendo com que os máximos principais sejam cada vez mais finos. Assim, para um grande número de fendas, se a fonte utilizada for monocromática, o padrão observado num alvo será constituído basicamente por linhas brilhantes, distintas e espacialmente bem resolvidas. Se a fonte de luz não for monocromática, o padrão de difração apresenta uma linha central brilhante correspondente ao máximo central ou de ordem zero, aparecendo os máximos de ordens superiores constituídos por linhas coloridas correspondentes aos diversos comprimentos de onda que constituem a fonte de luz. Este é o princípio de funcionamento das redes de difração largamente utilizadas na espectroscopia. As redes de difração são normalmente constituídas por várias centenas de linhas (fendas) por milímetro. Quanto maior este número maior será a resolução obtida com a rede de difração, isto é, melhor serão visualizadas as riscas correspondentes ao espectro de uma dada fonte de luz.

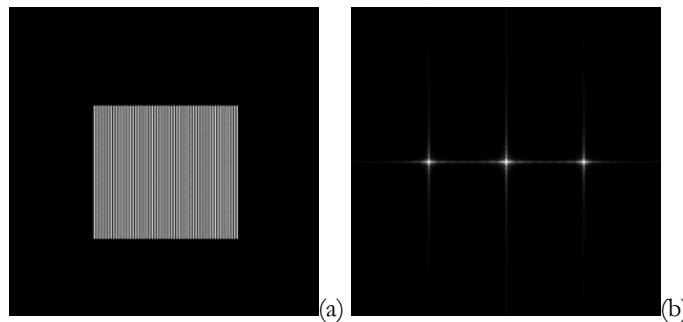


Figura 4- 13 Rede de fendas (a) e o respectivo padrão de difração de Fraunhofer (b).

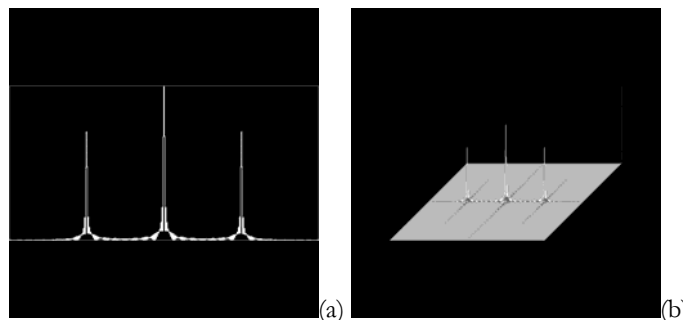


Figura 4- 14 Perfil horizontal do padrão de Difração de Fraunhofer de uma rede de fendas (a) e visualização a 3-D desse mesmo padrão de difração (b).

4.3.3.2 Difracção por uma abertura rectangular

Na secção 4.3.3.1 (caso de uma fenda simples) o estudo da difracção de Fraunhofer foi efectuado com base na aproximação de que o comprimento da fenda era infinitamente superior à sua largura, pelo que a frente de onda incidente sofre um espalhamento unicamente na direcção perpendicular ao comprimento da fenda. No entanto, se o comprimento e a largura da fenda tiverem dimensões reduzidas e comparáveis, a frente de onda sofre um espalhamento tanto na direcção vertical como na direcção horizontal. O padrão de difracção vai ser a combinação desses dois efeitos (ver figura 4-15).

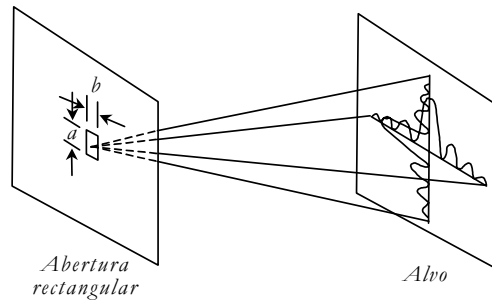


Figura 4- 15 Representação esquemática da geração do padrão de difracção por uma abertura rectangular de dimensões comparáveis.

A situação mais geral de uma abertura arbitrária está representada na figura 4-16.

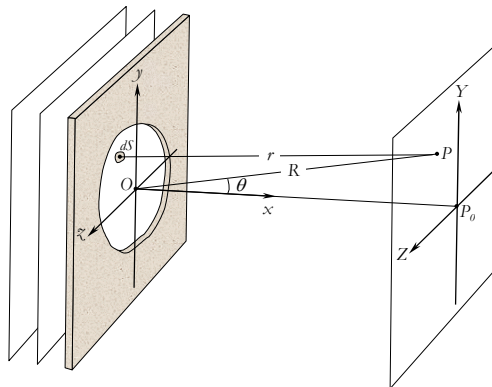


Figura 4- 16 Representação esquemática para uma abertura arbitrária.

De acordo com o princípio de Huygens cada elemento diferencial de área dS da superfície de uma abertura pode considerar-se como estando preenchido por fontes pontuais coerentes. Se as dimensões lineares de dS forem pequenas relativamente ao comprimento de onda, todas as ondas secundárias estarão em fase no ponto P interferindo construtivamente. Este resultado não depende de θ e dS pode ser considerado como uma fonte de ondas esféricas. A perturbação óptica em P devida a dS é obtida através da equação 4-34. Sendo $dE_0 = E_A dS$ a equação 4-34 pode ser escrita como

$$dE_p = \left(\frac{E_A}{r} \right) e^{i(kr - \omega t)} dS. \quad (4- 55)$$

A distância r entre dS , com coordenadas $(0, y, z)$, e P , com coordenadas (X, Y, Z) , e que se encontra representada na figura 4-16 é dada por

$$r = [X^2 + (Y - y)^2 + (Z - z)^2]^{1/2}. \quad (4-56)$$

Desenvolvendo a equação anterior e sabendo que a distância entre P e O é dada por $R = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2}$ obtém-se que

$$r = R[1 + (y^2 + z^2)/R^2 - 2(Yy + Zz)/R^2]^{1/2}. \quad (4-57)$$

Uma vez que R é muito maior que as dimensões da abertura, então o segundo termo da equação anterior pode ser desprezado. Efectuando a expansão binomial e considerando só os dois primeiros termos da expansão obtém-se

$$r = R[1 - (Yy + Zz)/R^2] \quad (4-58)$$

e substituindo r na equação 4-55 vem

$$E_p = \frac{E_A e^{i(kR - \omega t)}}{R} \iint_{abertura} e^{ik(Yy + Zz)/R} dS. \quad (4-59)$$

Particularizando para o caso de uma abertura rectangular representada na figura 4-17 e sendo $dS = dy \cdot dz$ então

$$E_p = \frac{E_A e^{i(kR - \omega t)}}{R} \int_{-b/2}^{b/2} e^{ikYy/R} dy \int_{-a/2}^{a/2} e^{ikZz/R} dz. \quad (4-60)$$

Calculando este integral obtém-se que

$$E_p = \frac{AE_A e^{i(kR - \omega t)}}{R} \left(\frac{\text{sen } \alpha}{\alpha} \right) \left(\frac{\text{sen } \beta}{\beta} \right), \quad (4-61)$$

onde $\alpha = kaZ/2R$ e $\beta = kbY/2R$, ou em função de θ , vem $\alpha = (ka/2)\text{sen } \theta$ e $\beta = (kb/2)\text{sen } \theta$. Assim, a irradiância pode ser determinada por

$$I = I_0 \left(\frac{\text{sen}^2 \alpha}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{\text{sen}^2 \beta}{\beta} \right)^2, \quad (4-62)$$

onde I_0 é a irradiância no ponto P_0 e que é dada por

$$I_0 = \frac{\epsilon_0 c}{2} \left(\frac{AE_A}{R} \right)^2. \quad (4-63)$$

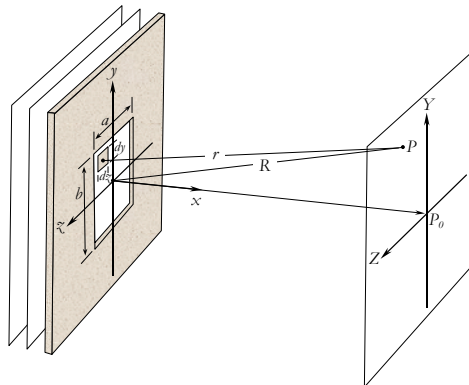


Figura 4-17 Representação esquemática para uma abertura rectangular.

Quando $\alpha = 0$, ou $\beta = 0$, a equação 4-62 assume a forma da irradiância para uma fenda simples. Quando α ou β são múltiplos inteiros não nulos de π , isto é, quando

$$Y = \frac{m\lambda R}{b} \quad (4-64)$$

ou

$$Z = \frac{p\lambda R}{a} \quad (4-65)$$

a irradiância dada pela equação 4-63 assume o valor zero e surgem mínimos de irradiância para esses pontos. Os máximos secundários estão localizados, aproximadamente, a meia distância entre dois mínimos, isto é, para $\beta = \pm 3/2\pi, \pm 5/2\pi, \dots$ e o mesmo acontecendo para α .

Nas figuras 4-18, 4-19, 4-20 e 4-21 apresentam-se os padrões de difracção de Fraunhofer, os respectivos perfis horizontais e verticais e a visualização tridimensional para uma abertura rectangular e para uma abertura quadrada.

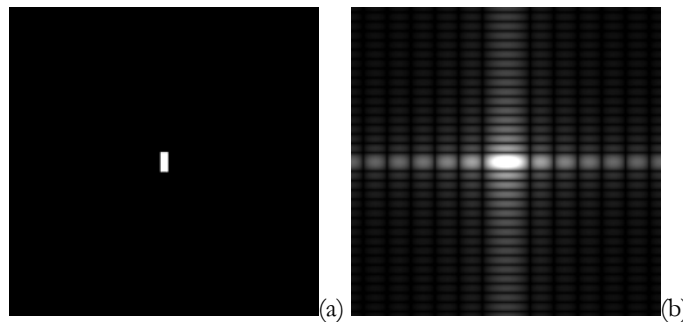


Figura 4- 18 Abertura rectangular (a) e respectivo padrão de difracção de Fraunhofer (b).

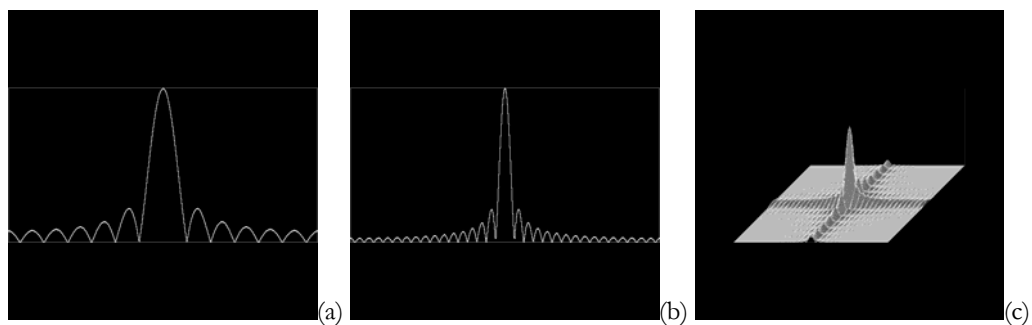


Figura 4- 19 Perfis horizontal(a) e vertical (b) do padrão de Difracção de Fraunhofer de uma abertura rectangular e visualização a 3-D desse mesmo padrão de Difracção de Fraunhofer (c).

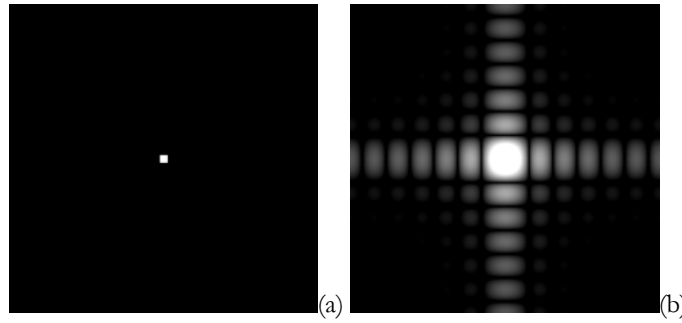


Figura 4- 20 Abertura quadrada (a) e respectivo padrão de difração de Fraunhofer (b).

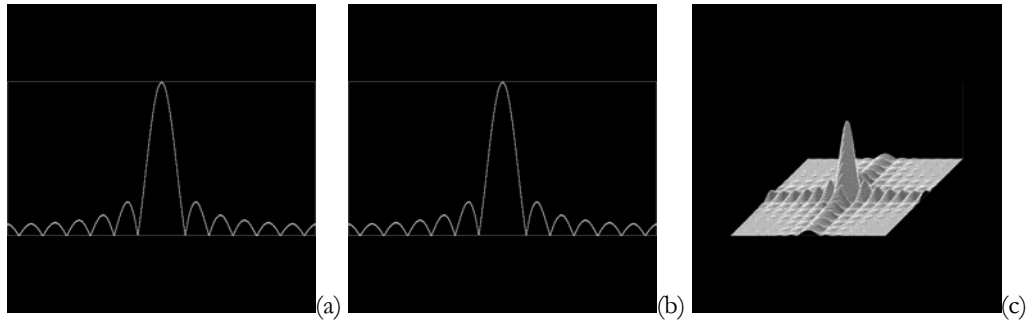


Figura 4- 21 Perfis horizontal(a) e vertical (b) do padrão de Difração de Fraunhofer de uma abertura quadrada e visualização a 3-D desse mesmo padrão de Difração de Fraunhofer (c).

Para cada máximo secundário $\sin \beta = 1$ e como ao longo do eixo β , uma vez que $\alpha = 0$, $(\sin \alpha / \alpha) = 1$ as irradiâncias relativas são aproximadas por $I/I_0 = 1/\beta^2$. De igual modo ao longo do eixo α as irradiâncias relativas são $I/I_0 = 1/\alpha^2$. Deste modo a razão entre as irradiâncias diminui de 1 para $\frac{1}{22}$, para $\frac{1}{62}$, para $\frac{1}{122}$, etc.

4.3.3.3 Difração por aberturas circulares e elípticas

O padrão de difração de Fraunhofer de uma abertura circular tem aplicações práticas importantes, nomeadamente no estudo de instrumentos e sistemas ópticos, uma vez que a maioria das lentes e aberturas são circulares. A imagem de uma fonte pontual distante formada por uma lente positiva, livre de aberrações, nunca é um ponto mas sim um padrão de difração de Fraunhofer (limite de resolução). O resultado é uma série de máximos e mínimos circulares e concêntricos, onde o máximo central é conhecido pela designação de disco de Airy.

Considerando uma abertura circular de raio a com origem em O e com eixos Ox e Oy perpendiculares, tal como apresentado na figura 4-22, e assumindo que a distribuição da luz através da abertura é constante e igual a $E_0 = E_A/R$ pode determinar-se a resultante da perturbação num ponto P de um alvo distante.

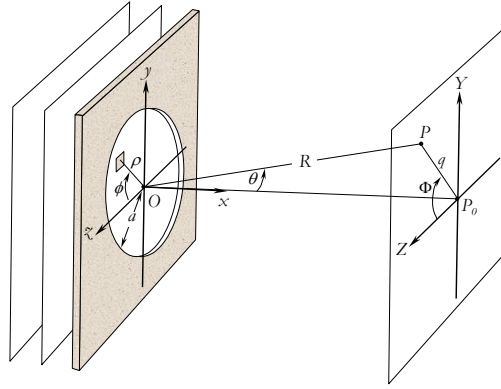


Figura 4- 22 Representação esquemática de uma abertura circular.

Tal como demonstrado na secção anterior (4.3.3.2), a expressão para a perturbação óptica em P , resultante de uma abertura arbitrária no caso de campo longínquo é dada pela equação 4-59.

Neste caso e devido à simetria da abertura é conveniente utilizar coordenadas polares esféricas em vez de coordenadas rectangulares. Se (ρ, ϕ) forem as coordenadas polares esféricas no plano da abertura e (q, Φ) as coordenadas polares esféricas no plano de observação do padrão de difracção, a sua relação com as coordenadas rectangulares é dada pelas seguintes expressões

$$x = \rho \cos \phi \quad e \quad y = \rho \sin \phi \quad (4- 66)$$

$$Z = q \cos \Phi \quad e \quad Y = q \sin \Phi . \quad (4- 67)$$

Neste novo sistema de coordenadas o elemento de superfície é dado pela expressão $dS = \rho d\rho d\phi$. Substituindo estas expressões na equação 4-59 obtém-se

$$E = E_0 e^{i(kR - \omega t)} \int_{\rho=0}^a \int_{\phi=0}^{2\pi} e^{i(k\rho q / R) \cos(\phi - \Phi)} \rho d\rho d\phi . \quad (4- 68)$$

Devido à simetria axial, o resultado é independente de Φ . Assim, considerando $\Phi = 0$, para se obter uma equação mais simplificada, a equação 4-68 reduz-se a

$$E = E_0 e^{i(kR - \omega t)} \int_{\rho=0}^a \int_{\phi=0}^{2\pi} e^{i(k\rho q / R) \cos \phi} \rho d\rho d\phi . \quad (4- 69)$$

Tendo em conta que

$$J_m(u) = \frac{i^{-m}}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{i(mv + u \cos v)} dv , \quad (4- 70)$$

é a função de Bessel de ordem m , a equação 4-69, para $m = 0$, reduz a

$$E = 2\pi E_0 e^{i(kR - \omega t)} \int_0^a J_0(k\rho q / R) \rho d\rho . \quad (4- 71)$$

Para calcular este integral utiliza-se uma propriedade das funções de Bessel (relação de recorrência) expressa matematicamente por

$$\frac{d}{du} [u^{m+1} J_{m+1}(u)] = u^{m+1} J_m(u) , \quad (4- 72)$$

que por integração e para $m = 0$ se reduz a

$$u J_1(u) = \int_0^u u' J_0(u') du' . \quad (4-73)$$

A partir da equação 4-71 efectuando-se a mudança de variável $u' = k\rho q / R$ e $d\rho = (R / kq) du'$ obtém-se que

$$E = 2\pi E_0 (R/kq)^2 e^{i(kR - \omega t)} \int_0^{kaq/R} u' J_0(u') du' . \quad (4-74)$$

Usando-se a equação 4-73 a equação 4.74 pode ser expressa por

$$E = 2\pi a^2 E_0 e^{i(kR - \omega t)} \left[\frac{J_1(kaq/R)}{kaq/R} \right] . \quad (4-75)$$

Assumindo que R se mantém constante em todo o espaço do padrão de difracção, a irradiância virá dada por

$$I = I_0 \left[\frac{2J_1(kaq/R)}{kaq/R} \right]^2 , \quad (4-76)$$

onde $I_0 = (\varepsilon_0 c^2) [(\pi a^2)^2 E_A^2 / 2R^2]$, que é o mesmo resultado que foi obtido para uma abertura rectangular. Como $\sin \theta = q/R$ a equação anterior pode ser escrita em função de θ como

$$I = I_0 \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right]^2 . \quad (4-77)$$

Esta equação foi deduzida pela primeira vez por Sir George Biddell Airy em 1835 e representa uma distribuição com um máximo central muito brilhante conhecido por disco de Airy (figura 4-23(b)). Este disco central está rodeado por um anel escuro correspondendo ao primeiro zero da função de Bessel. Este primeiro mínimo ocorre quando $u = 3.83$, isto é, para $kaq/R = 3.83$. O raio q_1 que vai até ao centro do primeiro mínimo pode ser considerado como o limite do disco de Airy. Os mínimos de ordem superior ocorrem quando $kaq/R = 7.02, 10.17, 13.32$, etc. (ver figura 4-23). Na figura 4-24(a) e (b) apresentam-se o perfil horizontal e a visualização tridimensional do padrão de difracção de Fraunhofer da abertura circular da figura 4-23(a). O primeiro mínimo é então dado por

$$q_1 = 1.22 \frac{R\lambda}{2a} \quad (4-78)$$

onde $2a$ representa o diâmetro da abertura. Os máximos secundários ocorrem para valores de u que satisfaçam a condição

$$\frac{d}{du} \left[\frac{J_1(u)}{u} \right] = 0 . \quad (4-79)$$

Através da relação de recorrência entre funções de Bessel $\frac{d}{du} [u^{-m} J_m(u)] = u^{-m} J_{m+1}(u)$ vem que

$$\frac{d}{du} \left[\frac{J_1(u)}{u} \right] = -\frac{J_2(u)}{u} . \quad (4-80)$$

Assim, para que a equação 4-79 seja satisfeita $J_2(u) = 0$. Esta situação ocorre quando u assume os valores 5.14, 8.42, 11.6, etc.

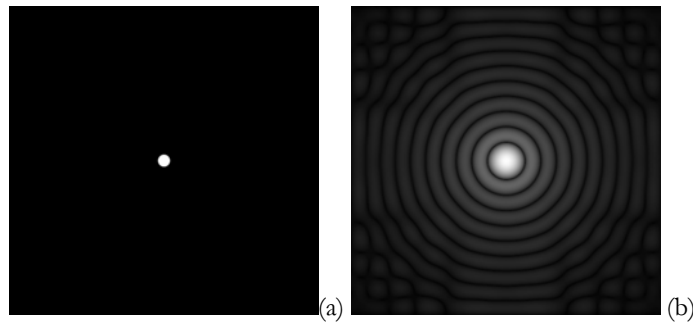


Figura 4- 23 Abertura circular (a) e o correspondente padrão de difracção de Fraunhofer (b).

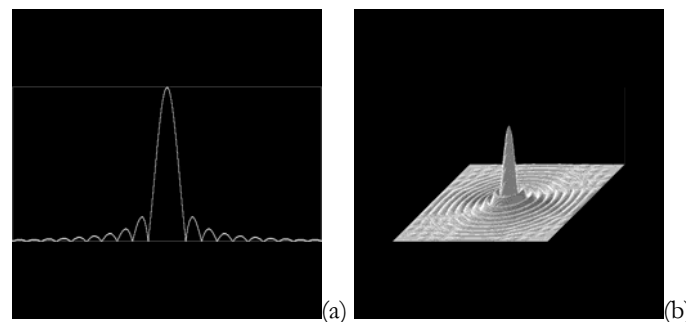


Figura 4- 24 Perfil horizontal do padrão de difracção de Fraunhofer de uma abertura circular (a) e visualização 3-D desse mesmo padrão de difracção de Fraunhofer (b).

Substituindo u por 0, 5.14, 8.42 e 11.6 e sabendo os valores correspondentes para $J_1(u)$, verifica-se que a razão entre a irradiância do padrão de difracção de uma abertura circular para os máximos secundários diminui para 1.75% do seu valor máximo para o primeiro máximo secundário, para 0.42% para o segundo e para 0.16% para o terceiro, etc.

Comparando os resultados obtidos para a difracção de Fraunhofer de uma abertura circular com os obtidos para uma abertura rectangular verifica-se que os mínimos para a abertura rectangular estão igualmente espaçados, ocorrendo para $\pi, 2\pi, 3\pi, 4\pi, 5\pi \dots$, enquanto que para uma abertura circular os mínimos ocorrem para $1.220\pi, 2.233\pi, 3.238\pi, 4.241\pi, 5.243\pi$, etc. Assim, o padrão de difracção para uma abertura circular não apresenta os mínimos igualmente equidistantes uns dos outros, verificando-se que com o aumento de q a separação entre mínimos ou máximos adjacentes tende para um valor constante igual a π .

Relativamente à abertura elíptica (ver figura 4-25), o conhecimento do seu padrão de difracção de Fraunhofer assume grande importância para esta tese uma vez que o modelo utilizado para a estrutura da folha de papel é o modelo do poro equivalente de Silvy [13] o qual demonstra que a estrutura da folha de papel pode ser modelizada, com grandes vantagens, através de uma figura elíptica resultante da distribuição das fibras quando estas se dispõem topo a topo salvaguardando a sua orientação.

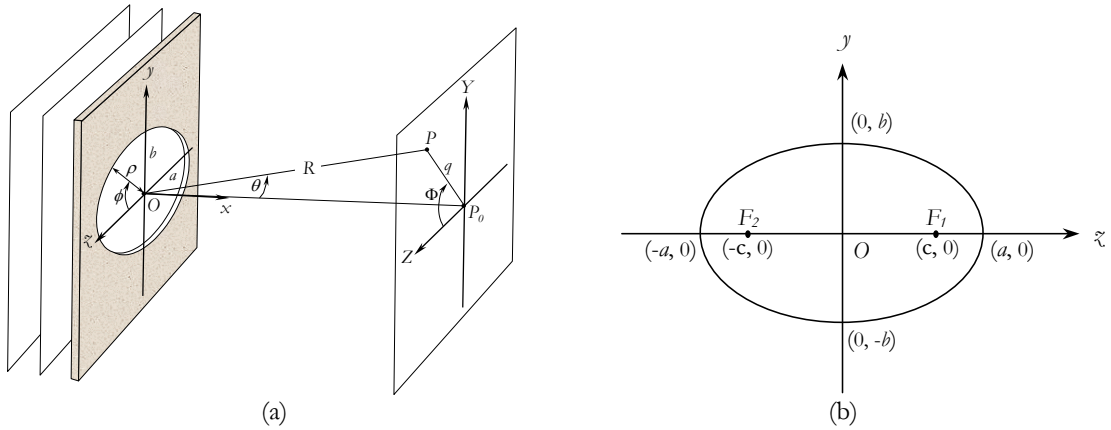


Figura 4- 25 Representação esquemática de uma abertura elíptica (a) e de uma elipse (b).

Tal como para abertura circular é necessário obter-se a equação da elipse em coordenadas polares para se conhecerem os limites de integração na expressão da perturbação óptica no ponto P (equação 4.59).

A equação cartesiana de uma elipse cujos focos se situam sobre os eixos coordenados em posições simétricas em relação à origem do referencial é dada por [14,15]

$$\frac{y^2}{b^2} + \frac{\xi^2}{a^2} = 1 \tag{4- 81}$$

onde y e ξ representam os eixos coordenados e a e b representam o comprimento dos semi-eixos maior e menor da elipse, respectivamente. Das propriedades da elipse conhece-se que [14,15]

$$a^2 - b^2 = c^2 \tag{4- 82}$$

e que

$$e = c/a \tag{4- 83}$$

onde a , b , c e e representam o comprimento dos semi-eixos maior e menor, a semi-distância focal e a excentricidade da elipse, respectivamente (ver figura 4-25(b)).

Resolvendo a equação 4-81 e tendo em atenção a equação 4-82 obtém-se

$$(a^2 - c^2)\xi^2 + a^2 y^2 = a^2 b^2 \tag{4- 84}$$

ou seja

$$a^2(\xi^2 - y^2) = a^2 b^2 + c^2 \xi^2 \tag{4- 85}$$

substituindo na equação 4-85 as equações 4-66, obtém-se

$$a^2 \rho^2 = a^2 b^2 + c^2 \rho^2 \cos^2 \theta \tag{4- 86}$$

donde

$$\rho^2 = \frac{a^2 b^2}{a^2 - c^2 \cos^2 \theta} \tag{4- 87}$$

Tendo em atenção a equação 4-83 a equação 4-87 pode ser escrita como

$$\rho = \frac{b}{\sqrt{1 - e^2 \cos^2 \theta}}, \quad (4-88)$$

que representa a equação da elipse em coordenadas polares.

Por forma a calcular-se o padrão de difracção de Fraunhofer de uma abertura elíptica (figura 4-25(a)), recorre-se à equação 4-59, substituindo-se os limites de integração gerais pelos limites correspondentes à elipse. Assim, obtém-se que

$$E = E_0 e^{i(kR - \omega t)} \int_{\rho=0}^{\rho=b/\sqrt{1-e^2 \cos^2 \theta}} \int_{\phi=0}^{2\pi} e^{i(k\rho q/R) \cos(\phi - \Phi)} \rho \, d\rho \, d\phi \quad (4-89)$$

devido à existência de simetria axial, tem-se

$$E = E_0 e^{i(kR - \omega t)} \int_{\rho=0}^{\rho=b/\sqrt{1-e^2 \cos^2 \theta}} \int_{\phi=0}^{2\pi} e^{i(k\rho q/R) \cos \phi} \rho \, d\rho \, d\phi. \quad (4-90)$$

Resolvendo esta equação tal como nos casos anteriores obtém-se que

$$E = 2\pi \left(\frac{b^2}{1 - e^2 \cos^2 \theta} \right) E_0 e^{i(kR - \omega t)} \left[\frac{J_1(kbq/R\sqrt{1 - e^2 \cos^2 \theta})}{(kbq/R\sqrt{1 - e^2 \cos^2 \theta})} \right], \quad (4-91)$$

e a irradiância virá dada por

$$I = I_0 \left[\frac{2J_1(kbq/R\sqrt{1 - e^2 \cos^2 \theta})}{(kbq/R\sqrt{1 - e^2 \cos^2 \theta})} \right]^2, \quad (4-92)$$

onde $I_0 = [(\epsilon_0 c)(\pi b^2 / (1 - e^2 \cos^2 \theta))^2 E_A^2 / 2R^2]$.

Na figura 4-26(b) pode ser observada a representação gráfica da irradiância (padrão de difracção de Fraunhofer) da abertura elíptica da figura 4-26(a) (equação 4-92). A figura apresenta uma máximo central elíptico rodeado de anéis elípticos claros e escuros concêntricos representando os valores máximos e mínimos da função, respectivamente. A forma elíptica do padrão de difracção é delimitada pela curva $\rho = f(\theta)$ onde θ representa o ângulo polar (ângulo medido a partir do eixo z).

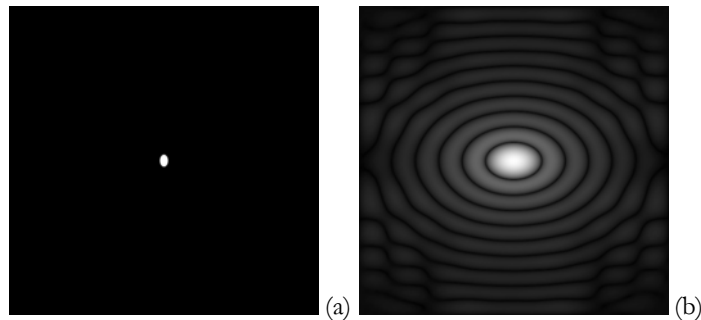


Figura 4-26 Abertura elíptica (a) e o correspondente padrão de difracção de Fraunhofer (b).

Foi verificado experimentalmente a igualdade entre as elipticidades (razão entre os comprimentos dos semi-eixos maior e menor) da abertura elíptica e do correspondente padrão de difracção.

Na figura 4-27(a), (b) e (c), apresentam-se os perfis horizontal e vertical do padrão de difração de uma abertura elíptica (elipticidade igual a 1.5) bem como a sua representação tridimensional.

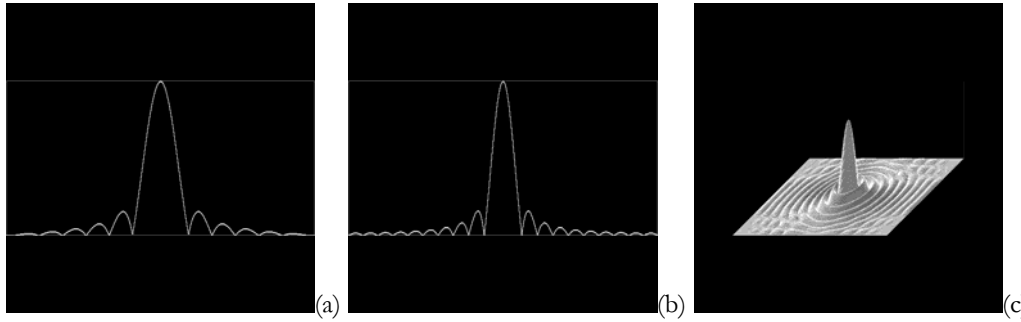


Figura 4- 27 Perfis horizontal (a) e vertical (b) do padrão de difração de uma abertura elíptica e representação 3-D desse mesmo padrão de difração (c).

Particularizando agora o estudo para os casos de aberturas em forma de anel circular e elíptico (ver figura 4-28(a) e (b)), as expressões para as perturbações ópticas devidas a este tipo de aberturas, continuam a ser dadas pela equação 4-59.

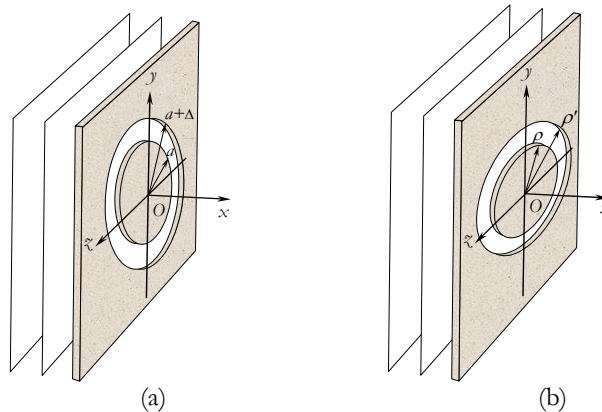


Figura 4- 28 Representação esquemática de uma abertura em forma de anel circular (a) e de uma abertura em forma de anel elíptico (b).

Utilizando-se novamente as coordenadas polares em vez de coordenadas rectangulares. Obtêm-se assim as seguintes equações:

Anel circular

$$E = E_0 e^{i(kR - \omega t)} \int_{\rho=a}^{\rho=a+\Delta} \int_{\phi=0}^{2\pi} e^{i(k\rho q / R) \cos \phi} \rho d\rho d\phi \quad (4- 93)$$

Anel elíptico

$$E = E_0 e^{i(kR - \omega t)} \int_{\rho=b/\sqrt{1-e^2 \cos^2 \theta}}^{\rho'=b/\sqrt{1-e^2 \cos^2 \theta}} \int_{\phi=0}^{2\pi} e^{i(k\rho q / R) \cos \phi} \rho d\rho d\phi \quad (4- 94)$$

Devido à simetria axial e tendo em atenção a equação 4-70 a equação 4-93 reduz-se a

$$E = 2\pi E_0 e^{i(kR - \omega t)} \int_a^{a+\Delta} J_0(k\rho q / R) \rho d\rho . \quad (4- 95)$$

Das propriedades fundamentais dos integrais definidos sabe-se que $\int_a^b f(x)dx = \int_0^b f(x)dx - \int_0^a f(x)dx$ [16, 17]. Assim, a equação 4-95 pode ser escrita como

$$E = 2\pi E_0 e^{i(kR - \omega t)} \left[\int_0^{a+\Delta} J_0(k\rho q/R) \rho d\rho - \int_0^a J_0(k\rho q/R) \rho d\rho \right]. \quad (4-96)$$

Resolvendo esta equação da mesma forma que se resolveu para o caso de uma abertura circular (figura 4-29(a)), obtém-se

$$E = 2\pi E_0 e^{i(kR - \omega t)} \left[(a + \Delta)^2 \frac{J_1(k(a + \Delta)q/R)}{k(a + \Delta)q/R} - a^2 \frac{J_1(kaq/R)}{kaq/R} \right], \quad (4-97)$$

donde a irradiância virá dada por

$$I = I' \left[2(a + \Delta)^2 \frac{J_1(k(a + \Delta)q/R)}{k(a + \Delta)q/R} - 2a^2 \frac{J_1(kaq/R)}{kaq/R} \right]^2. \quad (4-98)$$

A sua representação gráfica pode ser observada na figura 4-29(b).

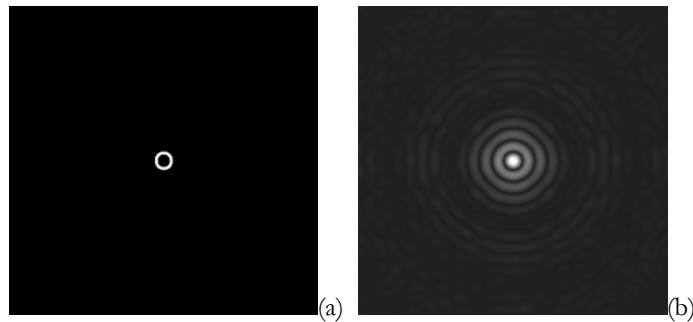


Figura 4- 29 Abertura em forma de anel circular (a) e o correspondente padrão de difracção de Fraunhofer (b).

Na figura 4-30(a), (b) e (c), apresentam-se os perfis horizontal e vertical do padrão de difracção de uma abertura em forma de anel circular bem como a sua representação tridimensional.

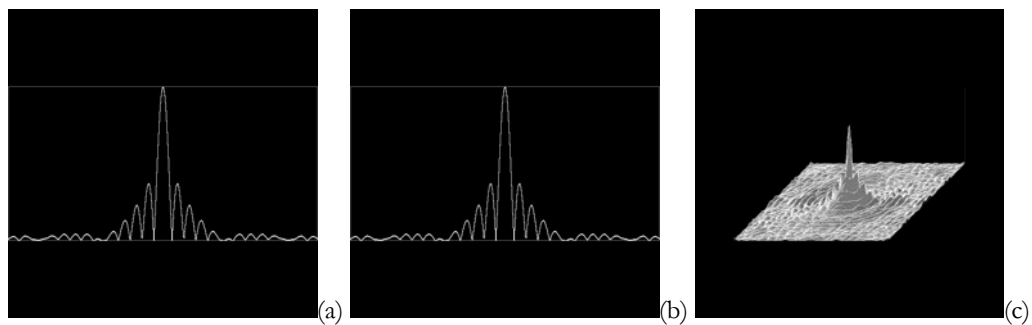


Figura 4- 30 Perfis horizontal (a) e vertical (b) do padrão de difracção de Fraunhofer de um anel circular e representação 3-D desse mesmo padrão de difracção de Fraunhofer (c).

Efectuando o mesmo tipo de raciocínio mas agora para o caso de uma abertura em forma de anel elíptico (figura 4-31(a)) tem-se

$$E = E_0 e^{i(kR - \omega t)} \int_{\rho=l/\sqrt{1-\epsilon^2 \cos^2 \theta}}^{\rho=b/\sqrt{1-\epsilon^2 \cos^2 \theta}} \int_{\phi=0}^{2\pi} e^{i(k\rho q/R) \cos \phi} \rho d\rho d\phi. \quad (4-99)$$

Devido à simetria axial e tendo em atenção a equação 4-70 a equação 4-93 reduz-se a

$$E = 2\pi E_0 e^{i(kR - \omega t)} \int_{b/\sqrt{1-\epsilon^2 \cos^2 \theta}}^{b'/\sqrt{1-\epsilon^2 \cos^2 \theta}} J_0(k\rho q/R) \rho d\rho. \quad (4-100)$$

Das propriedades fundamentais dos integrais definidos a equação 4-100 pode ser escrita como

$$E = 2\pi E_0 e^{i(kR - \omega t)} \left[\int_0^{b'/\sqrt{1-\epsilon^2 \cos^2 \theta}} J_0(k\rho q/R) \rho d\rho - \int_0^{b/\sqrt{1-\epsilon^2 \cos^2 \theta}} J_0(k\rho q/R) \rho d\rho \right]. \quad (4-101)$$

Resolvendo esta equação da mesma forma que se resolveu para os casos das outras aberturas, obtém-se

$$E = 2\pi E_0 e^{i(kR - \omega t)} \left[\left(\frac{b'^2}{1-\epsilon^2 \cos^2 \theta} \right) \frac{J_1(kb'q/R\sqrt{1-\epsilon^2 \cos^2 \theta})}{(kb'q/R\sqrt{1-\epsilon^2 \cos^2 \theta})} - \left(\frac{b^2}{1-\epsilon^2 \cos^2 \theta} \right) \frac{J_1(kbq/R\sqrt{1-\epsilon^2 \cos^2 \theta})}{(kbq/R\sqrt{1-\epsilon^2 \cos^2 \theta})} \right], \quad (4-102)$$

donde a irradiância virá dada por

$$I = I_0 \left[\left(\frac{b'^2}{1-\epsilon^2 \cos^2 \theta} \right) \frac{J_1(kb'q/R\sqrt{1-\epsilon^2 \cos^2 \theta})}{(kb'q/R\sqrt{1-\epsilon^2 \cos^2 \theta})} - \left(\frac{b^2}{1-\epsilon^2 \cos^2 \theta} \right) \frac{J_1(kbq/R\sqrt{1-\epsilon^2 \cos^2 \theta})}{(kbq/R\sqrt{1-\epsilon^2 \cos^2 \theta})} \right]^2, \quad (4-103)$$

sendo $I_0 = (\epsilon_0 c)(\pi E_0)^2 / 2R^2$, $b' = b + \Delta$ e $\epsilon' = d[(b + \Delta)/b]$.

A representação gráfica da irradiância pode ser observada na figura 4-31(b).

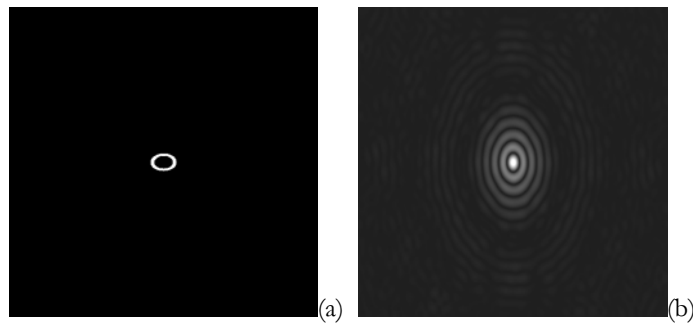


Figura 4- 31 Abertura em forma de anel elíptico (a) e o correspondente padrão de difração de Fraunhofer (b).

Na figura 4-32(a), (b) e (c), apresentam-se os perfis horizontal e vertical do padrão de difração de uma abertura em forma de anel elíptico bem como a sua representação tridimensional.

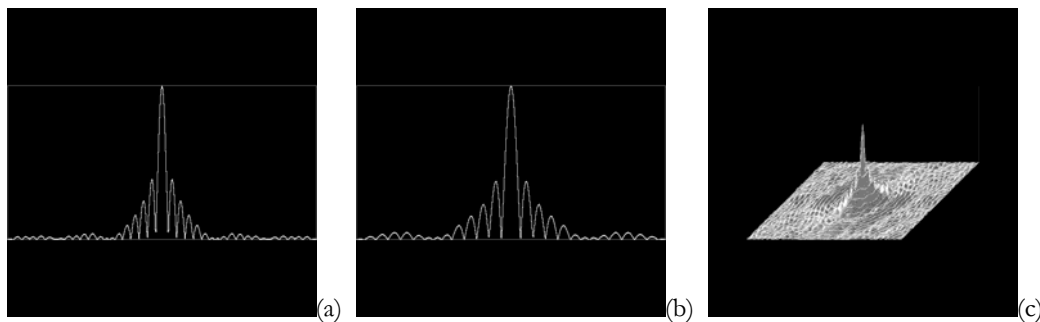


Figura 4- 32 Perfis horizontal (a) e vertical (b) do padrão de difração de Fraunhofer de um anel elíptico e representação 3-D desse mesmo padrão de difração de Fraunhofer (c).

4.3.3.4 Difracção por um objecto de fase

Até aqui só foi considerada a difracção através de aberturas que só alteram a amplitude da onda incidente. No entanto existem objectos que não absorvem a luz alterando somente a sua fase no processo de transmissão.

Qualquer objecto transparente de espessura não uniforme produz este efeito; sendo transparente e não possuindo uma espessura uniforme a luz ao passar por diferentes partes desse objecto sofre atrasos de fase proporcionais à espessura de material atravessado. Para uma frente de onda plana incidente a frente de onda que emerge do objecto deixa de ser plana devido às distorções provocadas pelas diferenças de espessura do objecto (ver figura 4-33). Se o índice de refracção do material for n , a diferença de percurso óptico entre dois percursos com espessuras d_1 e d_2 é dada por $n(d_1 - d_2)$. A diferença de fase resultante desta diferença de percurso óptico é dada por

$$\Delta\phi = kn\Delta d. \quad (4-104)$$

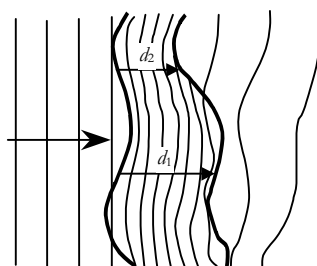


Figura 4- 33 Distorção de uma frente de onda plana por um meio transparente não uniforme.

Outra possibilidade, é a existência de alterações na fase apenas em certas partes da onda incidente tal como se apresenta na figura 4-34.

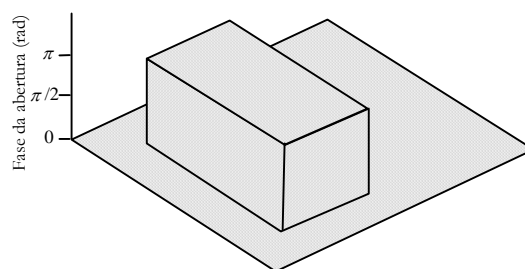


Figura 4- 34 Abertura complexa com um salto de π radianos.

Uma placa de vidro de faces paralelas que seja colocada sobre uma abertura não altera a amplitude da onda incidente. Como a luz se propaga mais devagar no vidro do que no ar, o vidro atrasa a parte da onda que passa através dela. Diz-se então que essa parte da onda sofreu um atraso de fase cujo valor depende da espessura do vidro. Se a placa tiver uma espessura d e um índice de refracção n , para o comprimento de onda utilizado, então o produto nd pode ser denominada de espessura óptica ou percurso óptico e $\Delta\phi = (2\pi / \lambda)nd$ será a diferença de fase resultante da introdução da placa de vidro.

Caso nd seja um múltiplo inteiro de λ não vai existir alteração no padrão de difracção, mas se ao invés o percurso óptico não corresponder a múltiplos inteiros de λ então existirão variações no padrão de difracção original que resultaria da abertura sem placa de vidro.

A expressão matemática para uma onda plana (equação 4-11) com um atraso de fase devido a diferenças de percurso óptico é

$$y(x, t) = y_0 e^{i[kx - \omega t \pm k\Delta\phi]}. \quad (4-105)$$

Por exemplo, no caso da inclusão de uma placa de vidro de faces paralelas numa parte da abertura, a expressão anterior será dada por

$$y(x, t) = y_0 e^{i(kx - \omega t)} e^{\pm i(2\pi/\lambda)nd}, \quad (4-106)$$

onde o último termo da equação 4-106 é o termo que representa o desvio de fase da onda que atravessa um meio transparente com índice de refracção diferente.

Se a função abertura $A(x, y)$ resultar de um material transparente com um percurso óptico nd ou de um objecto com uma espessura variável sobre a abertura, o atraso ou avanço de fase é descrito por uma função de fase da abertura $\phi(x, y)$, através de

$$e^{\pm i(2\pi/\lambda)\phi(x, y)}. \quad (4-107)$$

A função de uma abertura geral é dada assim por

$$A(x, y) e^{\pm i(2\pi/\lambda)\phi(x, y)}, \quad (4-108)$$

onde $\phi(x, y)$ e λ têm unidade de comprimento, pelo que o produto de $\phi(x, y)$ por $1/\lambda$ é uma quantidade adimensional. Assim, o expoente da exponencial é uma quantidade expressa em radianos. Se o percurso óptico atravessado for igual a um comprimento de onda isso corresponderá a um atraso de fase de 2π radianos da onda o que não provocará nenhuma alteração na onda resultante. Se $\phi(x, y) > 0$ a onda sofrerá um atraso relativamente à onda original. A situação em que $\phi(x, y) < 0$ não é fisicamente possível.

Nas secções 4.3.3.1, 4.3.3.2 e 4.3.3.3, foram descritos e apresentados os diversos padrões de difracção de Fraunhofer gerados por fendas, por aberturas rectangulares, quadradas, circulares e elípticas. No interior dessas aberturas a fase mantém-se constante, existindo unicamente alterações na amplitude da onda incidente. Essas aberturas são denominadas aberturas reais. No entanto, no que diz respeito às réplicas das superfícies da folha de papel, como existem variações de espessura ao longo da sua superfície consequência da penetração das fibras no material transparente da réplica, vão existir variações de fase associadas a essa variação de espessura. Desta forma, resulta que as réplicas das superfícies da folhas de papel podem ser consideradas objectos de fase. Na realidade as réplicas são produzidas com base numa película plana transparente na qual ficam registadas (locais de depressões na superfície do material da réplica), por pressão e aquecimento, as posições das fibras de cellulose existentes na superfície do papel. Segundo o modelo do poro equivalente uma rede de fibras pode ser

modelizada por uma figura elíptica (anel elíptico) representativa da sucessão das fibras unidas entre si pelas suas extremidades. Assim, é possível simular o efeito produzido pela transmissão da luz laser através das réplica recorrendo a uma abertura em forma de anel elíptico. Devido à existência de variações de espessura nas fibras que compõem a folha de papel, o anel elíptico que modeliza a réplica não poderá ter uma espessura constante implicando assim a existência de variações de fase ao longo do seu perímetro. Assim, a simulação deverá ser realizada com um anel elíptico que possui variações de fase ao longo do seu perímetro. Os resultados obtidos através desta simulação estão representados na figura 4-35(a) e (b), onde podem ser observados o padrão de difracção de um anel elíptico sem variação de fase e o padrão de difracção do mesmo anel elíptico mas com introdução de um factor de fase aleatório. O padrão de difracção gerado por um anel elíptico de fase apresenta uma forma elíptica na qual o máximo central e os máximos e mínimos secundários consecutivos, bem marcados no padrão de difracção de Fraunhofer de um elíptico real, encontram-se dissimulados, fazendo com que o padrão de difracção de Fraunhofer de uma anel elíptico de fase seja uma figura mais homogénea.

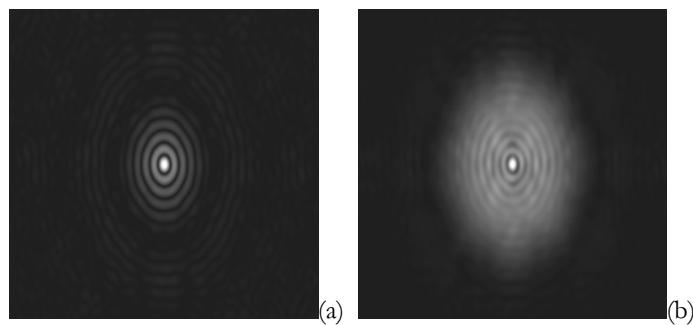


Figura 4- 35 Padrão de difracção de Fraunhofer de um anel elíptico sem introdução de um factor de fase (a) e padrão de difracção do mesmo anel elíptico com introdução de um factor de fase ao longo do seu perímetro (b).

Na figura 4-36(a), (b) e (c), apresentam-se o perfil horizontal e vertical do padrão de difracção do anel elíptico de fase, bem como a sua representação tridimensional.

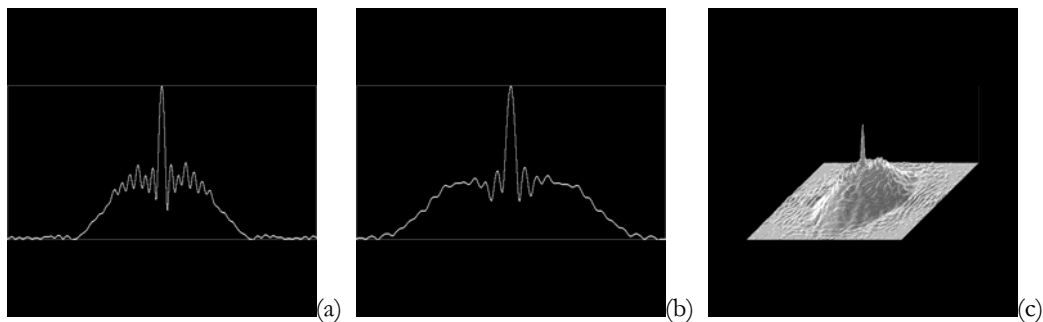


Figura 4- 36 Perfis horizontal (a) e vertical (b) do padrão de difracção de Fraunhofer de um anel elíptico com variação de fase ao longo do seu perímetro e representação tridimensional desse mesmo padrão de difracção de Fraunhofer (c).

Deve notar-se que tal como para o caso da abertura elíptica, foi verificado experimentalmente a igualdade entre as elipticidades (a/b) do anel elíptico, isto é da abertura, e do padrão de difracção correspondente. Desta forma demonstra-se a equivalência entre os resultados obtidos através do modelo do poro equivalente e os resultados obtidos através dos padrões de difracção gerados a partir de réplicas da superfície da folha de papel. Fica também validada a interpretação de que os padrões de difracção das réplicas da superfície do papel caracterizam a distribuição de fibras à superfície do papel.

Assim, os dois parâmetros relevantes para a caracterização da distribuição das fibras são a elipticidade do padrão de difracção, que está relacionada com a anisotropia de orientação da distribuição das fibras, e a direcção do eixo maior do padrão de difracção, que está relacionada com o ângulo de orientação principal da distribuição das fibras à superfície da folha de papel.

4.4 Difracção de Fraunhofer e transformadas de Fourier

A sobreposição de duas funções harmónicas com diferentes amplitudes e comprimentos de onda distintos, não é uma onda harmónica. Embora o perfil de uma tal onda não se assemelhe em nada a uma função sinusoidal ela pode no entanto, ser representada por funções sinusoidais com amplitudes, comprimentos de onda e fase relativas seleccionadas. Esta técnica que permite a decomposição de uma onda não harmónica em funções harmónicas é devida ao Barão de Fourier segundo o qual qualquer função $f(x)$, de período λ , pode ser representada como a soma de funções harmónicas de comprimentos de onda iguais a submúltiplos inteiros de λ , isto é, λ , $\lambda/2$, $\lambda/3$, etc. A representação em série de Fourier de uma função $f(x)$ assume então a forma [18-22]

$$f(x) = C_0 + C_1 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x + \varepsilon_1\right) + C_2 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda/2}x + \varepsilon_2\right) + \dots, \quad (4-109)$$

onde C_0, C_1, C_2, \dots , são constantes a determinar. Quanto mais termos incluir a função $f(x)$ melhor será a qualidade da aproximação. Fazendo uso da igualdade trigonométrica

$$C_m \cos(mkx + \varepsilon_m) = A_m \cos mkx + B_m \sin mkx, \quad (4-110)$$

onde $A_m = C_m \cos \varepsilon_m$ e $B_m = -C_m \sin \varepsilon_m$, pode escrever-se

$$f(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos mkx + \sum_{m=1}^{\infty} B_m \sin mkx. \quad (4-111)$$

Para cada função $f(x)$ a análise de Fourier permite determinar os coeficientes A_0 , A_m e B_m . Como A_0 representa o valor médio da função $f(x)$ e como a média das funções seno e coseno sob um intervalo de amplitude λ é nula, temos que

$$A_0 = \frac{2}{\lambda} \int_0^{\lambda} f(x) dx. \quad (4-112)$$

Relativamente aos coeficientes de Fourier A_m e B_m , representando as amplitudes espectrais de cada harmónica, eles são determinados com base na ortogonalidade das funções sinusoidais, isto é,

$$\int_0^{\lambda} \sin akx \cos bkx dx = 0, \quad (4-113)$$

$$\int_0^{\lambda} \cos akx \cos bkx dx = \frac{\lambda}{2} \delta_{ab}, \quad (4-114)$$

$$\int_0^{\lambda} \sin akx \sin bkx dx = \frac{\lambda}{2} \delta_{ab}, \quad (4-115)$$

onde a e b são inteiros não nulos e δ_{ab} é a função delta de Kronecker que é igual a 1 quando a e b são iguais e é igual a 0 quando a é diferente de b .

Assim, para calcular A_m basta multiplicar ambos os termos da equação 4-111 por uma função coseno e integrar em ordem a λ e para calcular B_m basta multiplicar por uma função seno e integrar em ordem a λ . Obtém-se assim que

$$\begin{aligned} A_m &= \frac{2}{\lambda} \int_0^\lambda f(x) \cos mkx \, dx, \\ B_m &= \frac{2}{\lambda} \int_0^\lambda f(x) \sin mkx \, dx. \end{aligned} \quad (4-116)$$

A importância relativa de cada frequência é determinada através dos correspondentes coeficientes de Fourier os quais constituem uma medida da contribuição de cada uma das harmônicas. Desta forma, a envolvente dos valores de cada coeficiente constitui o chamado espectro de frequências espaciais.

No caso de funções pares, B_m (equação 4-116) é sempre zero, acontecendo o mesmo para A_m no caso de funções ímpares. Em ambos os casos $f(x)$ simplifica-se reduzindo-se a dois termos. As funções reais $\cos mkx$ e $\sin mkx$ podem ser tidas como as partes real e imaginária da exponencial complexa $\exp(imkx)$. Assim $f(x)$ pode ser descrita, através de funções exponenciais, da seguinte forma

$$f(x) = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} C_m e^{imkx}, \quad (4-117)$$

onde C_m é dado por

$$C_m = \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda f(x) \cdot e^{-imkx} \, dx. \quad (4-118)$$

No caso de a função ser não periódica, matematicamente interpretada como uma função periódica cujo período tende para infinito, é possível generalizar as séries de Fourier para integrais de Fourier. À medida que o período aumenta as frequências espaciais diminuem estando por isso cada vez mais próximas. No entanto, a envolvente permanece inalterável sendo determinada unicamente pela função não periódica original. No limite quando o período se torna infinito, caso de uma função não periódica, todas as frequências são possíveis e a função corresponde à própria envolvente, isto é, torna-se numa função contínua. Esta envolvente é chamada de transformada de Fourier da função não periódica e é definida por

$$F(u) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-iux} \, dx, \quad (4-119)$$

sendo $f(x)$ dada por

$$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(u) e^{ikx} \, du \quad (4-120)$$

$f(x)$ e $F(u)$ são as transformada de Fourier uma da outra e constituem por isso um par de transformadas de Fourier.

Este tratamento pode e deve ser estendido a funções bidimensionais, muito importantes em óptica. Para funções bidimensionais a transformada de Fourier é definida em função de duas componentes de frequência espacial sendo uma generalização a duas dimensões da transformada de Fourier unidimensional dada pela equação 4-119, isto é,

$$F(u, v) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) e^{-i(u x + v y)} dx dy . \quad (4-121)$$

Se a função $f(x, y)$, for de variáveis separáveis, isto é, se puder ser escrita como o produto de $f_1(x) \cdot f_2(y)$, o integral da equação 4-121 pode ser dividido em dois integrais independentes representando duas transformadas de Fourier unidimensionais (propriedade da separabilidade).

$$F(u, v) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-i u x} dx \int_{-\infty}^{+\infty} f(y) e^{-i v y} dy = F_1(u) F_2(v) \quad (4-122)$$

Retornando à secção 4.3.3 onde foi tratada a difracção de Fraunhofer para várias aberturas pode concluir-se das equações 4-38 (para uma fenda simples), 4-60 (para uma abertura rectangular) e 4-69 (para uma abertura circular) que o padrão de difracção de Fraunhofer, descrito por $E_p(u, v)$, é simplesmente a transformada de Fourier da função abertura descrita por $E_s(x, y)$, isto é, $E_p(u, v) = F\{E_s(x, y)\}$.

O padrão de difracção de Fraunhofer de uma dada abertura pode ser obtido experimentalmente com a utilização de uma lente convergente (ver figura 4-37). A luz proveniente de uma fonte pontual (coerência espacial) monocromática (coerência temporal) é filtrada por um filtro espacial constituído por uma abertura circular de dimensões muito reduzidas (da ordem dos micro metros) e colimada através de uma lente de colimação (L_1) que torna o feixe divergente proveniente da abertura circular numa frente de onda plana. Este feixe luminoso incide na abertura (objecto) produzindo um padrão de difracção bidimensional. Uma segunda lente convergente (L_2), colocada depois da abertura, forma o padrão de difracção de Fraunhofer no seu plano focal. Com este tipo de montagem evitam-se as grandes distâncias de observação (necessárias para a validação da condição de campo longínquo), normalmente de vários metros, passando-se a trabalhar com distâncias da ordem das dezenas de centímetros.

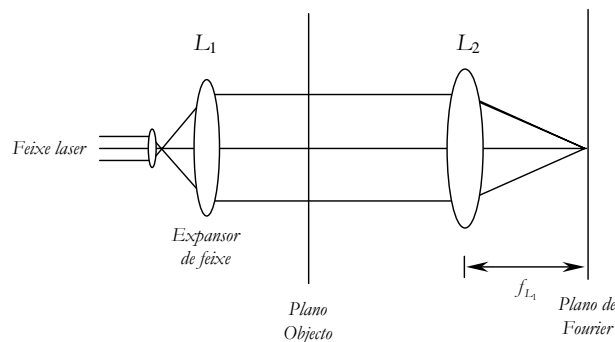


Figura 4- 37 Esquema da montagem óptica para observação da difracção de Fraunhofer produzida por uma abertura.

Como a transformada de Fourier é uma transformada em amplitude (e também em fase) e não em irradiância, a função de abertura é descrita pela amplitude da luz transmitida. Estando a razão entre a amplitude incidente e a amplitude transmitida, denominada de transmissão, em contraponto com a razão entre a irradiância incidente e a irradiância transmitida, denominada de transmitância, a função de abertura em termos de amplitude pode também ser chamada de função de transmissão. À lente L_2 também se pode chamar de lente de Fourier. Se a função de transmissão estiver localizada no plano focal principal da lente L_2 , o padrão de difracção de Fraunhofer (transformada de Fourier) é observado no plano focal secundário dessa mesma lente. A este plano também se chama plano de Fourier. Como os padrões de difracção são pela sua natureza registos de intensidades são também denominados por transformadas ópticas Fourier em vez de transformadas de Fourier que são manifestações de amplitude e de fase.

De uma forma geral, o sistema para a aquisição de padrões de difracção é constituído por câmaras de vídeo que registam unicamente a irradiância da luz perdendo-se toda a informação de fase. Assim, a posição do objecto em relação à lente de Fourier é irrelevante. O objecto pode ser colocado em qualquer local em frente da lente de Fourier para se gerar um padrão de difracção. No entanto, para se evitar uma redução gradual da irradiância da imagem para pontos da periferia (efeito de vinhetagem) [1], o objecto deve ser colocado o mais próximo possível da lente.

4.5 Resumo

Neste capítulo foram apresentados e discutidos os conceitos sobre a teoria da Interferência e Difracção, tendo sido descritas várias equações de ondas a uma, duas e a três dimensões, bem como foram discutidos os princípios da sobreposição de oscilações, o princípio de Huyghens e a experiência de Young.

Foi dado grande ênfase à difracção de Fraunhofer uma vez que é uma das teorias que serve de base a esta tese. Por esse motivo, foi discutido e aprofundado o fenómeno da difracção de Fraunhofer produzido tanto pelas aberturas gerais (fenda simples, dupla, abertura rectangular e abertura circular) como também por outras aberturas de fundamental importância para esta tese como são os casos de aberturas elípticas e anéis elípticos. Estas aberturas são fundamentais uma vez que, estando esta tese dedicada ao estudo do *reconhecimento do padrão óptico da estrutura da folha de papel*, a teoria base para esse estudo é o modelo do poro equivalente que sustenta que qualquer rede de fibras pode ser modelizada por uma figura elíptica (anel elíptico).

Foi ainda incluída uma simulação demonstrativa de aplicabilidade da teoria do modelo do poro equivalente ao tema desta tese. Vários exemplos ilustrativos dos padrões de difracção obtidos para as várias aberturas foram incluídos com a correspondente base teórica. A finalizar apresentou-se uma breve relação entre o fenómeno da difracção de Fraunhofer e as Transformadas de Fourier.

Referências

- [1] Hecht, E., “Optics”, 3th ed., Pub. Addison Wesley Longman, Inc., New York (1998).
- [2] Lipson, S. G., “Optical Physics”, 3th ed., Pub. Cambridge University Press, Cambridge (1995).
- [3] Guenther, R. D., “Modern Optics”, Pub. John Wiley & Sons, Inc., New York (1990).
- [4] Smith, F.G., Thomson, J. H., “Optics”, 2th ed., Pub. John Wiley & Sons, Ltd., New York (1988).
- [5] Giancoli, D. C., “Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics”, 2nd ed., Pub. Prentice-Hall, Inc., New Jersey (1988).
- [6] Meyer-Arendt, Jurgen R. “Introduction to Classical and Modern Optics”, 4th ed., Pub. Prentice-Hall, Inc., New Jersey (1995).
- [7] Wilson, R., “Fourier Series and Optical Transform Techniques in Contemporary Optics: An Introduction”, Pub. John Wiley & Sons, Inc., New York (1995).
- [8] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J., “Fundamentals of Physics - extended”, 5th Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York (1997).
- [9] Pedrotti F. L.; Pedrotti L. S. “Introduction to Optics” ”, 2th ed., Pub. Prentice-Hall, Inc., New Jersey (1993).
- [10] Jenkins, F. A., White, H. E., “Fundamentals of Optics”, 4th ed., Pub., Mcgraw-Hill Book Company, Inc., Singapore (1976).
- [11] Beynon, J.H., “Introductory University Optics”, Prentice Hall Europe, Hertfordshire (1996).
- [12] Rossi, B., “Optics”, 3th ed., Pub. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Massachusetts (1965).
- [13] Silvy, J., “Étude Structurale de Milieux Fibreux”, These de Doctorat D' Etat Es-Sciences, Université Cientifique et Médicale, Institut National Polytechnique de Grenoble (1980).
- [14] Larson, R.E., Hostetler, R.P., “Calculus - with Analytic Geometry”, 2nd Edition, D.C. Heath and Company (1982).
- [15] Wylie, C. R. Jr., “Advanced Engineering Mathematics”, Pub. Mcgraw-Hill Book Company, Inc., New York (1951).

- [16] Piskounov, N., “Cálculo Diferencial e Integral”, Vol. I, traduzido do Russo por A.E.P. Teixeira e M.J.P.Teixeira, Lopes da Silva Editora, Porto (1980).
- [17] Piskounov, N., “Cálculo Diferencial e Integral”, Vol. II, traduzido do Russo por A.E.P. Teixeira e M.J.P.Teixeira, Lopes da Silva Editora, Porto (1980).
- [18] Goodman, J. W., “Introduction to Fourier Optics”, McGraw-Hill Classic Textbook Reissue Series, Pub McGraw-Hill, Inc. (1988).
- [19] Steward, E.G., “Fourier Optics: An Introduction”, 2nd ed., Pub. Ellis Horwood Limited, London (1989).
- [20] Morrison, N., “Introduction to Fourier Analysis”, Pub. John Wiley & Sons, Inc., New York (1994).
- [21] Bracewell, R. N., “The Fourier Transform and its Applications”, 2nd ed., McGraw-Hill series in Electrical and Electronic Engineering, Pub. Mcgraw-Hill Book Company, Inc., Singapore (1986).
- [22] Bell, R. J., “Introductory Fourier Transform Spectroscopy”, Pub. Academic Press, Inc., New York (1972).
- [23] Wolfram, S., “The Mathematica Book”, Copub. Wolfram Media, Inc. and Cambridge University Press, New York (1996).
- [24] Taylor, C., “Diffraction – Student monographs in physics”, Adam Hilger, Bristol (1987).
- [25] Taylor, C., Lipson H., “Optical Transforms”, Bell and Hyman, London (1964).
- [26] Villate, J. E., “Electromagnetismo”, Editora Mcgraw-Hill de Portugal, Lda, Lisboa (1999).
- [27] Blaker, J.W., Rosenblum, W.M., “Optics - An Introduction for Students of Engineering”, Macmillan Publishing Company, New York (1993).

Capítulo 5

Reconhecimento do padrão de difracção

5.1 Introdução

Nos capítulos anteriores foram apresentadas e descritas as várias técnicas existentes para a caracterização da estrutura da folha de papel, o sistema de processamento digital de imagens e a teoria de suporte a esta tese (o modelo do poro equivalente e a teoria da difracção).

Este capítulo vai ser dedicado à apresentação do método óptico proposto, desenvolvido e implementado para a caracterização da estrutura da superfície da folha de papel. Com este método é possível efectuar-se o reconhecimento dos padrões de difracção da luz laser produzidos pelas superfícies das réplicas da folha de papel, quantificando-se a anisotropia e o ângulo de orientação preferencial da distribuição das fibras nas superfícies da folha de papel.

O objectivo principal nesta tese é a análise da estrutura da folha de papel tendo em conta a sua organização por camadas de fibras. A análise de um material tão fino como uma folha de papel, cuja espessura pode em média variar entre 50 e 100 μm , é muito importante tendo em atenção as propriedades exigidas ao papel para os seus diferentes usos. Por exemplo, quando se utiliza uma folha de papel para fotocópia ou impressão estabelecem-se na espessura da folha gradientes de temperatura e humidade ao fim da passagem da folha entre os rolos da fotocopiadora ou impressora que se encontram a temperaturas elevadas. No processo de fotocópia e de impressão, as dilatações térmicas e as contracções durante o processo de secagem são diferentes nas duas faces da folha podendo, caso o papel não seja de boa qualidade, alterar a planaridade da folha originando o encravamento da folha dentro da fotocopiadora e/ou da impressora.

Com vista a garantir a qualidade final do papel, é extremamente importante efectuar-se continuamente, em tempo real (na máquina de papel) e/ou em laboratório, uma quantificação objectiva das propriedades do papel produzido.

Devido à opacidade da folha de papel, a análise da difracção da luz é realizada usando réplicas transparentes das suas superfícies (réplicas negativas). Na produção das referidas réplicas utilizam-se folhas de poli-estireno de 230×300 mm com uma espessura de 0.25 mm (ref. 12-4763-00 da Plastic Films Company) sobre as quais ficam registados os mais pequenos detalhes da superfície da folha de papel quando estas são pressionadas sobre o papel a uma determinada temperatura.

Os padrões de difracção obtidos com as réplicas das superfícies da folha de papel, possuem uma forma elíptica característica da figura de difracção de Fraunhofer para redes planas de fibras [1-2]. No caso específico do papel, essa forma elíptica é resultante do processo de fabrico que deforma os agregados de fibras (flocos) aquando da sua chegada à caixa de formação da máquina de papel. Os flocos, inicialmente esferas, tornam-se elipsóides sob o efeito das forças de cisalhamento exercidas sob a suspensão fibrosa através da espessura da folha em formação [3-5]. A elipticidade do padrão de difracção, isto é, a razão entre os comprimentos dos eixos maior e menor (a/b) do contorno que envolve o padrão de difracção, permite caracterizar a anisotropia da distribuição de fibras no plano da folha [6]. Valores de elipticidade próximos da unidade indicam distribuições de fibras quase isotrópicas, enquanto que valores de elipticidade elevados (grandes anisotropias) indicam a presença de elevado grau de orientação na distribuição das fibras. Tipicamente os valores da anisotropia da distribuição das fibras em folhas de papel de impressão comuns situam-se entre um e dois.

Na secção 5.2 será esquematizada a metodologia usada na análise de folhas de papel (200×200 mm²), enquanto que na secção 5.3 será apresentado e descrito o procedimento experimental, que inclui o método de produção de réplicas de folhas de papel bem como a avaliação da qualidade das réplicas produzidas, através de métodos ópticos (microscopia óptica, electrónica e metalográfica) e por técnicas padrão da indústria papelreira (lisura Bekk, rugosidade Bendtsen e a rugosidade *IGT*). Será ainda apresentada detalhadamente nesta secção toda a montagem experimental implementada. Na secção 5.4 serão discutidos os resultados experimentais obtidos para as várias amostras de papel e efectuada a comparação do método proposto com outros métodos de utilização comum pela indústria papelreira. Finalmente, na secção 5.5 serão apresentadas algumas aplicações práticas deste método ao estudo das propriedades do papel e um resumo do capítulo.

5.2 Metodologia

A metodologia utilizada na análise é a seguinte:

- Produzir réplicas das superfícies das amostras das folhas de papel,
- Gerar padrões de difracção de Fraunhofer das superfícies das réplicas, através de um varrimento com um feixe de luz laser, registando-os e armazenando-os num computador digital para posterior processamento,

- Para cada padrão de difracção registado determinar o contorno que melhor se ajusta ao padrão criado pelas superfícies das réplicas das folha de papel. Esse contorno deverá ter o menor desvio quadrático médio e a diferença angular entre os seus eixos principais deverá ser a mais próxima de 90°, para os diferentes níveis de intensidade do padrão,
- Para cada contorno quantificar os diâmetros máximo e mínimo referentes aos eixos maior e menor do contorno, bem como o ângulo do eixo maior em relação à direcção máquina,
- Calcular a elipticidade (a/b) do contorno que envolve o padrão de difracção e o ângulo de orientação preferencial das fibras,
- Gerar um mapa que contenha toda a informação respeitante às condições de realização do varrimento, os resultados globais médios (anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras e respectivos desvios padrões). Para cada ponto analisado na superfície da réplica o mapa apresenta um segmento de recta cujo comprimento é proporcional à anisotropia da distribuição de fibras e cuja inclinação corresponde ao ângulo de orientação preferencial da distribuição das fibras nesse ponto.

5.3 Parte experimental

A investigação desenvolvida teve como finalidade o reconhecimento de padrões de difracção da luz laser pelas superfícies das folhas de papel para assim se caracterizar a sua estrutura, tendo como base as anisotropias e ângulos de orientação da distribuição das fibras que as constituem, e envolveu a produção de réplicas das superfícies da folha de papel em filmes finos de poli-estireno, a montagem e desenvolvimento de um difractor óptico para obtenção de padrões de difracção da luz laser das referidas réplicas e a aplicação de um algoritmo desenvolvido especificamente para a quantificação dos parâmetros (comprimentos dos eixos e ângulos relativos ao eixo horizontal) do contorno geométrico que envolve o padrão de difracção (uma circunferência no caso de papéis isotrópicos ou uma elipse no caso de papéis anisotrópicos).

Nas secções seguintes será apresentado e discutido o método utilizado para a produção de réplicas transparentes das superfícies da folha de papel, bem como a montagem experimental implementada. Os resultados experimentais resultantes da aplicação do algoritmo referido aos padrões de difracção gerados com o sistema óptico serão também apresentados e discutidos.

5.3.1. Produção de réplicas transparentes

Para se obterem réplicas das superfícies de uma folha de papel, com a maior fidelidade possível, iniciou-se o estudo revestindo-se as amostras de papel com uma solução concentrada de acetato de celulose seguida de uma evaporação do solvente. Numa fase posterior, utilizou-se um polímero termoplástico com um baixo ponto de fusão onde a folha de papel era colocada contra esse polímero sendo o conjunto posteriormente aquecido até uma temperatura adequada. Estes dois métodos

apresentavam no entanto um grave problema de adesão entre o polímero e a amostra de papel, não sendo possível a obtenção de réplicas das superfícies do papel. Finalmente, utilizou-se um filme de poli-estireno (da Plastic Films Company) com um ponto de fusão mais elevado e com prensagem a quente, em que o filme é colocado contra a amostra de papel e o conjunto colocado no interior de uma prensa (ver figura 5-1(a)) composta por duas placas metálicas [7-11].

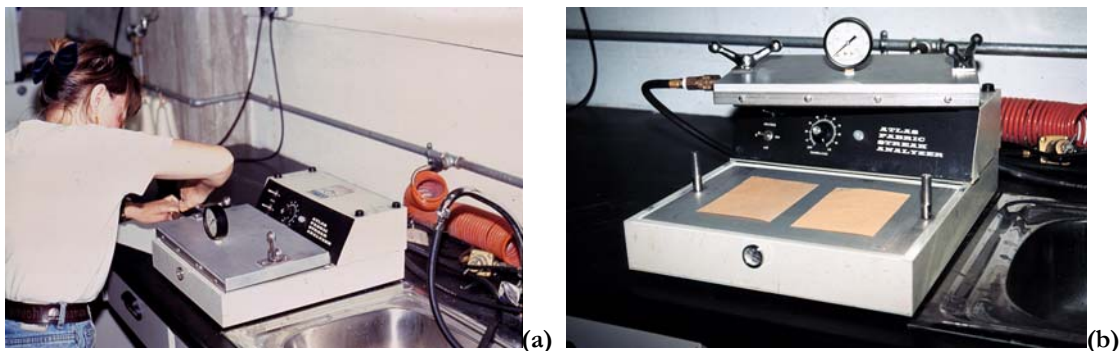


Figura 5- 1 Prensa para produção de réplicas das superfícies das folhas de papel.

A placa superior é perfurada para, através de ar comprimido, se poder aumentar a pressão sobre o conjunto (réplica-papel) enquanto que a placa inferior pode ser aquecida através de uma resistência interna e posteriormente arrefecida pela circulação de água no seu interior.

As condições de funcionamento da prensa para produção de réplicas são: temperatura de 115 °C e pressão de 350 kPa, durante 20 minutos. Este método é válido tanto para amostras com fibras curtas como para amostras com fibras longas, bem como para amostras isotrópicas e anisotrópicas.

Caso seja necessário garantir idênticas condições na produção de réplicas das duas superfícies de uma folha de papel, as duas réplicas são produzidas ao mesmo tempo cortando-se a folha de papel em duas partes iguais e colocando-se a face correspondente a cada um dos dois troços de papel sob a placa inferior da prensa conforme se pode visualizar na figura 5-1(b).

A qualidade das réplicas foi avaliada em primeiro lugar por observação directa numa lupa binocular (ver figuras 5-2 e 5-3) com uma ampliação que pode atingir os 400 aumentos. As imagens observadas nas figuras 5-2(a) e 5-3(a) são as imagens da superfície de um papel de pinho e eucalipto, respectivamente, enquanto que as imagens observadas nas figuras 5-2(b) e 5-3(b) são as imagens das superfícies das réplicas obtidas dos referidos papéis de pinho e eucalipto, respectivamente. De notar que as imagens da superfície do papel e da superfície da réplica apresentadas nas figuras 5-2 e 5-3 não dizem respeito à mesma posição no papel e na réplica.

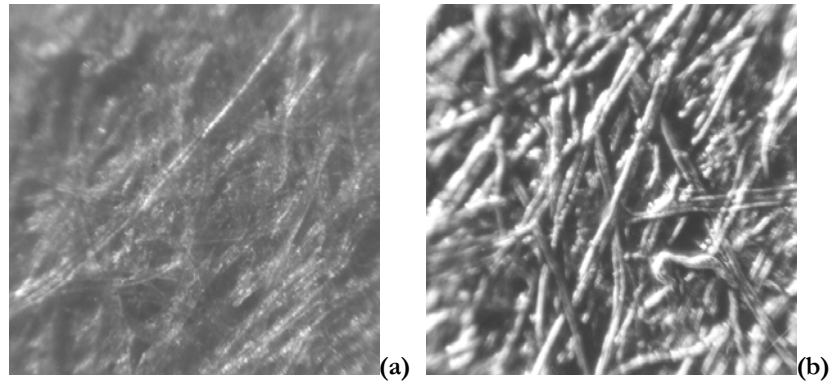


Figura 5- 2 Imagens da superfície de uma folha de papel de pinho (a) e da superfície da réplica (b), obtidas com uma lupa binocular a 400 aumentos.

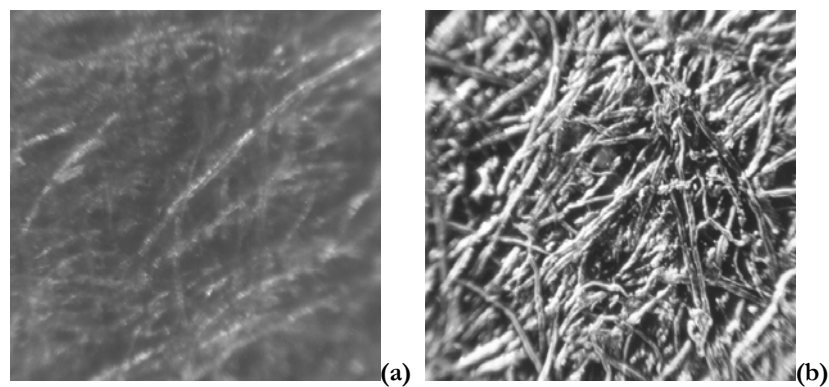


Figura 5-3 Imagens da superfície de uma folha de papel de eucalipto (a) e da superfície da réplica (b), obtidas com uma lupa binocular a 400 aumentos.

Para se avaliar em pormenor os detalhes da superfície da réplica é necessário obterem-se imagens da superfície da folha de papel em que esses pormenores sejam bem visíveis. Assim, para se conseguirem imagens com a resolução e o contraste necessários a uma boa visualização da superfície da folha de papel recorreu-se à microscopia electrónica de varrimento. Na figura 5-4 apresenta-se a imagem da folha de papel e a respectiva réplica para a mesma posição, obtidas por microscopia electrónica de varrimento a 150 aumentos.

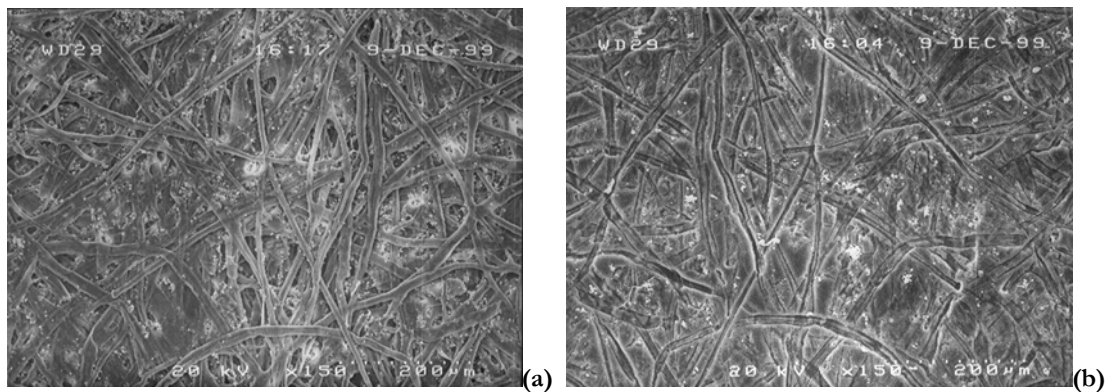


Figura 5-4 Imagens da superfície de uma folha de papel (a) e da superfície da réplica correspondente para a mesma posição (b), obtidas por microscopia electrónica de varrimento a 150 aumentos.

Conforme se pode observar na figura 5-4, os detalhes da superfície da folha e das fibras são reproduzidos fielmente sobre a réplica chegando a confundir mesmo os observadores mais especializados.

Para se controlar a qualidade das réplicas foram aplicadas ainda três técnicas utilizadas na indústria papelreira: a lisura Bekk, a rugosidade Bendtsen e a rugosidade *IGT*.

A lisura Bekk foi medida em diferentes pontos da superfície da folha e da réplica para se controlar a profundidade de penetração das fibras da superfície da folha de papel no filme fino de poli-estireno da réplica. Dos estudos realizados pôde concluir-se que a lisura das réplicas das superfícies das folhas de papel, para papéis isotrópicos e anisotrópicos, tende a aproximar-se, para ambas as superfícies da folha (face teia-*FT* e face feltro-*FF*), da lisura da amostra de papel original para pressões mais elevadas (350 kPa) [12].

Das medições da rugosidade Bendtsen observou-se que os valores resultantes para a rugosidade das réplicas das superfícies das folhas de papel, para pressões da ordem dos 350 kPa, são muito próximos dos das amostras de papel para ambas as faces [12]. Em média, a percentagem de erro calculada entre os resultados obtidos para a rugosidade das superfícies das réplicas e das superfícies das amostras de papel, é de 5%.

Os resultados das duas técnicas anteriores também se confirmaram pelo método da rugosidade *IGT*, (laminação de uma gota de corante entre duas tiras de papel ou de réplicas). A superfície da mancha que fica registada na superfície de cada folha depende da lisura das mesmas. Observou-se que as réplicas produzidas apresentam valores de rugosidade que se correlacionam com os das folhas de papel [12]. Para este método a percentagem de erro calculada entre os valores obtidos para a profundidade de penetração apresentada pelas réplicas e pelas folhas de papel é bastante superior aos outros dois métodos (em média de 30%). Este desvio é consequência da elevada porosidade do papel. A porosidade do papel influencia as dimensões da mancha observada nas suas faces as quais são muito pequenas originando desvios significativos nas medições das suas superfícies.

Em conclusão, pode afirmar-se que o método implementado para produção de réplicas é capaz de produzir réplicas transparentes de grandes dimensões e de elevada qualidade reflectindo fielmente a superfície da amostra da folha de papel.

As réplicas obtidas permitem obter uma boa resolução para a análise óptica e assegurar uma boa amostragem da superfície da folha de papel. De notar que o método é não destrutivo e que a estrutura das folhas de papel não é alterada no que diz respeito à orientação das fibras no plano da superfície apesar da pressão e temperaturas aplicadas.

Para se conhecer a influência do tipo de fibras e do grau de refinação na profundidade de penetração das fibras nas réplicas, foram produzidas réplicas de ambas as superfícies de uma selecção de papéis de pinho e eucalipto com diferentes graus de refinação e diferentes anisotropias de distribuição de fibras. Essas réplicas foram depois analisadas pelo método da rugosidade *IGT* e por microscopia óptica e electrónica.

Os resultados obtidos pelo método da rugosidade *IGT* para as réplicas dos papéis estudados estão apresentados na figura 5-5. Nestas réplicas estudou-se a variação dos valores obtidos para ambas as superfícies (face teia – *FT* e face feltro – *FF*). Para o papel anisotrópico mediu-se a rugosidade *IGT* tanto para a direcção máquina (*DM*) como para a direcção transversal (*DT*) da folha de papel.

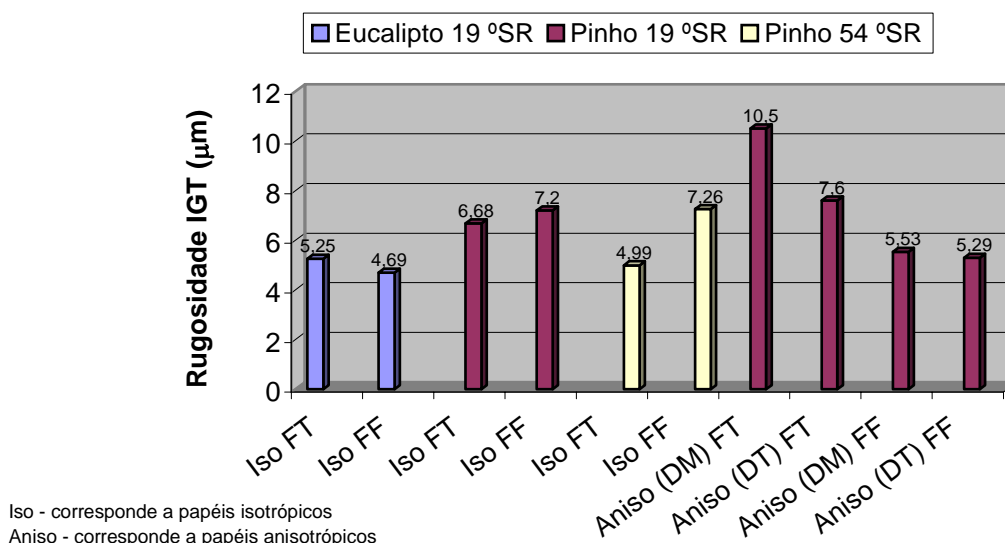


Figura 5- 5 Resultados da medição da rugosidade *IGT* para réplicas de diferentes tipos de papel.

Do gráfico anterior e comparando os resultados obtidos para os dois tipos diferentes de fibras, verifica-se a existência de uma menor rugosidade para o caso de papéis de eucalipto relativamente aos valores obtidos para os papéis de pinho. Em relação ao grau de refinação verifica-se que a rugosidade diminui com o aumento do grau de refinação, isto é, a rugosidade é menor para pastas refinadas a 54 °SR.

Os valores anteriores são confirmados por microscopia óptica metalográfica e electrónica conforme se pode depreender das figuras 5-6 e 5-7, onde as réplicas de eucalipto apresentam uma menor profundidade de penetração das fibras no material da réplica.

Na análise por microscopia óptica metalográfica compararam-se os valores da espessura das réplicas das folhas de papel de eucalipto e pinho com a espessura do filme de poli-estireno original. Os resultados foram para as réplicas de eucalipto uma penetração média de 6.5 µm e para as réplicas de pinho uma penetração de 8.6 µm.

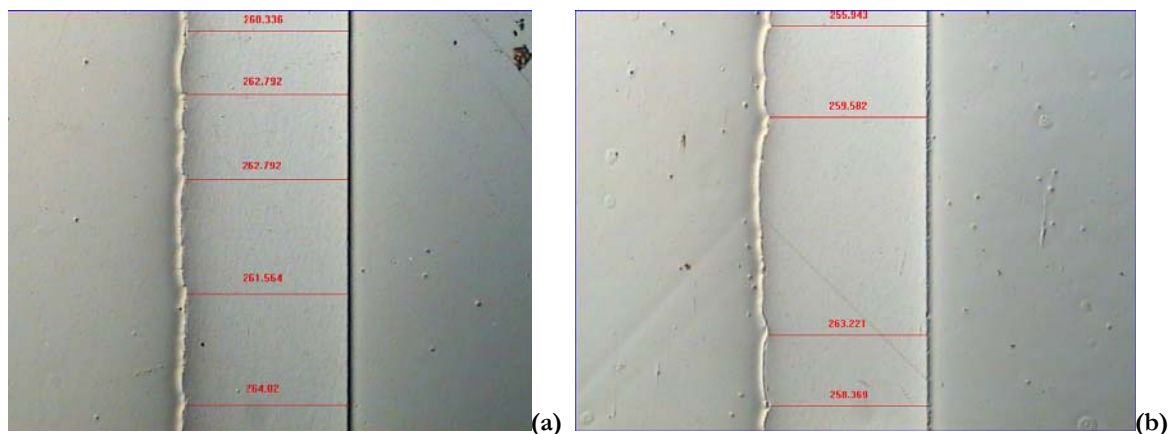


Figura 5-6 Imagens dos cortes transversais de réplicas (a) de papel de eucalipto e (b) de papel de pinho, obtidas por microscopia metalográfica a 100 aumentos (valores em μm).

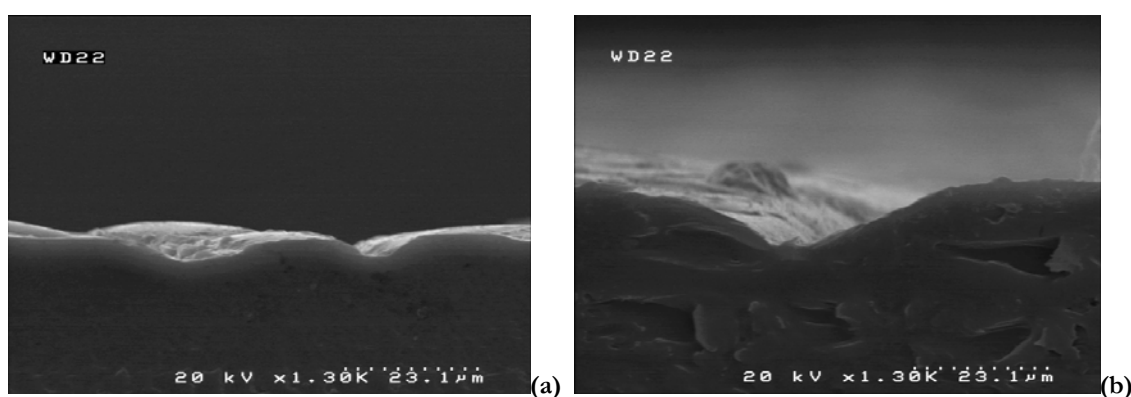


Figura 5-7 Imagens dos cortes transversais das réplicas (a) de papel de eucalipto e (b) de papel de pinho, obtidas por microscopia electrónica de varrimento a 1300 aumentos.

A profundidade de penetração das fibras no material da réplica corresponde sensivelmente a 1/10 da espessura total da folha de papel analisada (a espessura de uma folha de papel varia entre 50 μm para papéis de menor gramagem e 100 μm para papéis de maior gramagem). Como a análise é feita para ambas as superfícies da folha de papel é explorada cerca de 1/5 da espessura total da folha com as réplicas das superfícies.

5.3.2. Sistema óptico experimental

Para se poderem obter padrões de difracção de Fraunhofer da réplica da superfície da folha de papel, para posterior processamento num computador digital, foi desenvolvido e implementado no laboratório de investigação em Interferometria e Difracção Laser do Departamento de Física da Universidade da Beira Interior, um sistema óptico experimental tal como apresentado esquematicamente na figura 5-8.

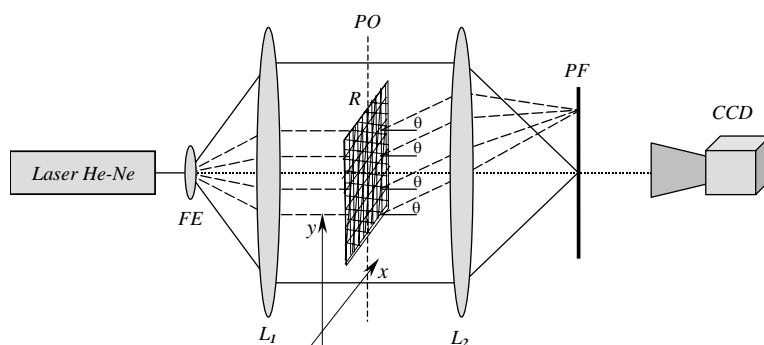


Figura 5-8 Esquema do sistema óptico experimental.

O sistema óptico é constituído por um difractor óptico que utiliza um laser de He-Ne de 5 mW de potência linearmente polarizado a emitir a 632.8 nm, um filtro espacial (FE) e uma lente colimadora (L_1) para produzir um feixe de luz plano e paralelo. Este feixe de luz monocromático é usado para iluminar a réplica da superfície da folha de papel (R) posicionada depois da lente colimadora (plano objecto - PO).

O filtro espacial permite de uma forma conveniente, remover o ruído e imperfeições existentes na frente de onda do feixe laser provenientes de defeitos ópticos e de partículas de pó no ar, aumentando significativamente a resolução do sistema. A filtração espacial compreende a produção de uma imagem da fonte com todas as imperfeições existentes no percurso óptico focando o feixe sobre uma abertura circular situada no eixo óptico. A abertura circular, de dimensões reduzidas, permite bloquear as componentes de alta frequência dessa imagem às quais está associado a maior parte do ruído, obtendo-se uma frente de onda perfeita.

Toda a luz que atravessa a réplica, e que por ela é desviada, é colectada pela lente de Fourier (L_2) de grandes dimensões (para evitar a redução gradual da irradiância da imagem para pontos da periferia (vinhetagem) e as aberrações primárias). A réplica da superfície da folha de papel introduz alterações na fase da frente de onda que a atravessa devido às variações de espessura do filme de poli-estireno que constitui a réplica. Estas variações de espessura correspondem à penetração das fibras de celulose da superfície da folha de papel no material da réplica, conforme mencionado no capítulo 4. A lente de Fourier cria um padrão de difracção no seu plano focal (plano de Fourier - PF) onde está colocado um alvo translúcido. Um detector de estado sólido (CCD) através de uma macro objectiva capta a imagem do padrão de difracção para ser registada, armazenada e posteriormente processada num computador digital. O CCD está ligado a uma placa de aquisição e processamento de imagem instalada no computador através da qual se efectua o registo das distribuições de intensidade do padrão de difracção sob a forma de imagens de 512×512 pixels, com 256 níveis de cinzento (8 bits).

Um programa de aplicação específico foi desenvolvido para suportar o presente estudo. O referido programa controla os processos de aquisição e registo das imagens dos padrões de difracção das réplicas das folhas de papel e com base nos dados registados executa todo o processamento necessário

à quantificação da anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras à superfície da folha de papel.

5.3.3. Especificações do sistema óptico experimental

No presente sistema, do qual se apresenta uma fotografia na figura 5-9, o feixe de luz proveniente do laser de He-Ne é focado através de uma objectiva de microscópio de $40\times$ e filtrado espacialmente através de uma abertura circular de $10\ \mu\text{m}$ de diâmetro. Esta abertura está colocada no plano focal da objectiva de microscópio e o resultado é a obtenção de um feixe laser expandido e filtrado espacialmente. Este feixe é posteriormente colimado com a ajuda da lente de colimação L_1 que possui uma distância focal de $f = 150\ \text{mm}$, por forma a produzir um feixe de luz monocromático circular plano e paralelo com um diâmetro de $40\ \text{mm}$ que vai incidir na superfície da réplica. Toda a luz que passa pela réplica, e que por ela é desviada, é colectada pela lente de Fourier de grandes dimensões (L_2) que possui uma distância focal de $f = 345\ \text{mm}$, para gerar um padrão de difracção num alvo translúcido situado no plano de Fourier (plano focal da lente L_2).

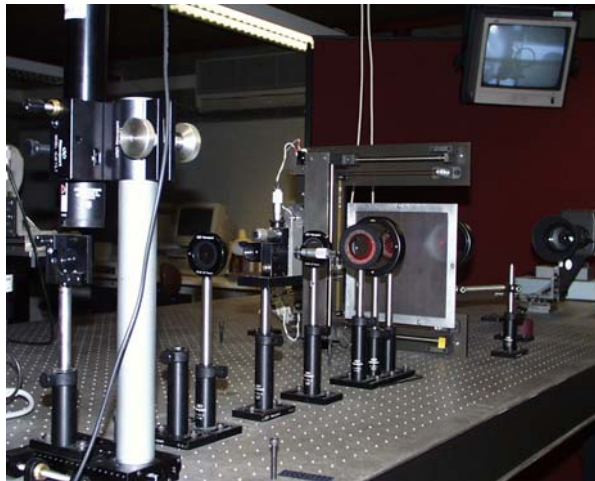


Figura 5-9 Fotografia geral do sistema óptico.

O padrão de difracção é captado utilizando-se para o efeito uma macro objectiva com uma distância focal entre $7.5\ \text{mm}$ e $97.5\ \text{mm}$, um sistema de aumento (“*zoom*”) de $13\times$, uma abertura relativa de $f/1.4$ e uma distância de focagem mínima com macro de $30\ \text{mm}$. Desta forma, a imagem do padrão de difracção é criada sobre a área activa do sensor de estado sólido (*CCD*) tal como indicado na figura 5-10.

Como a área activa do sensor de estado sólido (*CCD*) é de $6.4 \times 4.9\ \text{mm}^2$, e desta só se utiliza uma área de aproximadamente $4.4 \times 4.4\ \text{mm}^2$, a imagem do padrão de difracção formada no alvo translúcido com dimensões de aproximadamente $120 \times 120\ \text{mm}^2$ (no caso específico de amostras isotrópicas) tem de ser reduzida para ficar compreendida dentro dessa área. Assim, foi necessário definir um factor de redução de valor $35\times$.

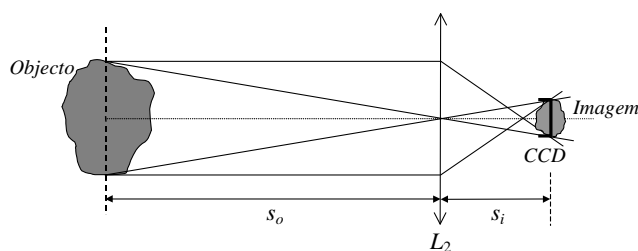


Figura 5-10 Esquema da formação da imagem de um objecto sobre a área activa do CCD através de uma lente positiva (lente equivalente à macro objectiva).

Pode obter-se uma redução de $35\times$ para o sistema óptico em questão fazendo $M = 1/35$ na equação da óptica geométrica que relaciona a ampliação com as distâncias ao objecto e à imagem, isto é $|M_T| = s_i/s_o$, onde M_T representa a ampliação lateral da imagem e s_o e s_i representam respectivamente as distâncias entre o plano objecto e a lente L_2 e o plano imagem e a lente L_2 . Desta forma, a imagem do padrão de difracção formado na área activa do CCD terá as dimensões de $3.4 \times 3.4 \text{ mm}^2$ para o caso de amostras de papel com uma distribuição isotrópica de fibras.

Conhecida a ampliação do sistema e a distância entre o alvo e o CCD, pode simplificar-se o sistema substituindo a macro objectiva por uma lente única equivalente. Sabendo que a distância entre o alvo e o CCD é de 550 mm , os resultados obtidos para a distância objecto, distância imagem e distância focal da lente equivalente são: $s_o = 534.7 \text{ mm}$, $s_i = 15.3 \text{ mm}$ e $f_{\text{equiv.}} = 14.9 \text{ mm}$.

Por forma a verificar experimentalmente a redução utilizada realizaram-se experiências simples com o sistema óptico. Colocou-se na posição do alvo uma régua graduada em milímetros. Com a macro objectiva obteve-se uma imagem da régua graduada. Esta imagem foi armazenada no computador tendo-se medido no computador as dimensões da imagem. Verificou-se que 100 mm da régua graduada equivaliam a 335 ± 1 pixels na imagem armazenada no computador, correspondendo portanto a $(335 \pm 1) \times 8.6 \mu\text{m} = 2881 \pm 8.6 \mu\text{m}$, isto é, $2.881 \pm 0.0086 \text{ mm}$ uma vez que cada pixel possui uma dimensão de $8.3 \times 8.6 \mu\text{m}^2$, o que corresponde a uma redução de facto de $34.7 \approx 35\times$.

De seguida introduziu-se no feixe laser colimado uma fenda simples de $50 \mu\text{m}$ de largura e 20 mm de comprimento e obteve-se o seu padrão de difracção de Fraunhofer no alvo apresentado na figura 5-11.



Figura 5-11 Padrão de difracção de Fraunhofer de uma fenda simples de $50 \mu\text{m}$ de largura.

Com a macro objectiva formou-se a imagem deste padrão de difracção no *CCD* a qual foi armazenada e processada posteriormente no computador. A largura do máximo central da imagem do padrão de difracção formada no *CCD* corresponde a 29 ± 1 pixels, donde como cada pixel possui uma dimensão de $8.3 \times 8.6 \mu\text{m}^2$, vem $(29 \pm 1) \times 8.6 \mu\text{m} = 249.4 \pm 8.6 \mu\text{m}$, ou seja, $0.2494 \pm 0.0086 \text{ mm}$.

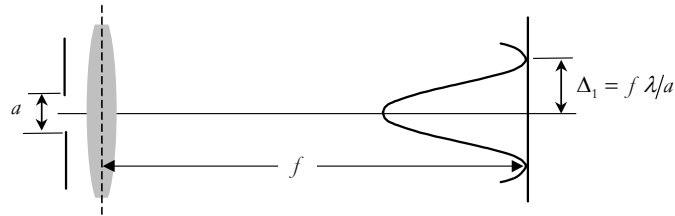


Figura 5- 12 Esquema da produção do padrão de Fraunhofer para o caso de uma fenda simples.

De acordo com a teoria de difracção de Fraunhofer, a distância (Δ_m) entre o máximo central e os mínimos sucessivos do padrão de difracção de uma fenda simples de largura a no foco de uma lente de distância focal f uniformemente iluminada por luz monocromática de comprimento de onda λ , tal como apresentado na figura 5-12, pode ser expresso através da seguinte equação [13-18]:

$$\Delta_m = m \frac{\lambda f}{a} \text{ com } m = 1, 2, 3, \dots \quad (5- 1)$$

Com base na equação 5-3 e substituindo os valores teóricos para o comprimento de onda do laser utilizado (632.8 nm), para a distância focal da lente de Fourier (345 mm) e para a largura da fenda simples ($50 \mu\text{m}$), obtém-se para a separação entre o máximo central e o primeiro mínimo no alvo translúcido o valor de $\Delta_1 = 4.366 \text{ mm}$. Assim, a largura do máximo central no alvo translúcido será de $2\Delta_1$ isto é, 8.732 mm .

Relacionando este valor de 8.732 mm com o valor obtido para a largura do máximo central do padrão de difracção formada no *CCD* (0.2494 mm) obtém-se uma redução de 35.1, praticamente $35 \times$, confirmando o valor da redução calculada anteriormente.

Relativamente ao *CCD* este encontra-se ligado ao computador através de uma placa de aquisição e processamento de imagem para digitalização e armazenamento das imagens dos padrões de difracção. Outro aspecto importante relaciona-se com o posicionamento e alinhamento do *CCD* no sistema óptico. O *CCD* encontra-se montado num suporte de precisão $xy\zeta$ tornando possível a execução de movimentos em todas as direcções do espaço. A precisão do alinhamento do *CCD* envolve em primeiro lugar o posicionamento manual do *CCD* através do suporte $xy\zeta$ seguido de um alinhamento por computador na direcção xy utilizando as ferramentas desenvolvidas para movimentos independentes das imagens adquiridas no alvo. A precisão conseguida é de um pixel tanto na direcção vertical como na direcção horizontal ($1 \text{ pixel} = 8.6 \mu\text{m}$).

A aquisição e armazenamento da informação da intensidade a partir do plano de Fourier pode apresentar dois problemas relacionados com o ruído de fundo gerado pelas correntes de escuro

presentes no sensor de estado sólido (*CCD*) e com a saturação dos pixeis devida à alta intensidade luminosa do feixe utilizado. Estes dois problemas podem ser muito atenuados. Em relação ao ruído de fundo este pode ser reduzido através do ajuste dos níveis de preto do conversor analógico digital da placa de aquisição e processamento em tempo real durante o processo de digitalização. Relativamente à saturação dos pixeis este problema é resolvido através da selecção de uma velocidade de obturação adequada para o diafragma do *CCD*. Após o ajuste do sistema experimental, pode adquirir-se a armazenar-se toda a informação relativa à distribuição de intensidades de um padrão de difracção no computador para posterior processamento e análise.

Idealmente a distribuição de intensidade correspondente à frente de onda de um feixe laser colimado deve possuir um perfil gaussiano truncado tal como o apresentado na figura 5-13(a) e (b), onde se apresentam a simulação de uma frente de onda e o respectivo perfil gaussiano truncado. Na prática, a abertura circular real não apresenta uma distribuição de intensidade uniforme conforme se pode observar na figura 5-13(c) e (d), onde se apresentam a frente de onda real e o seu perfil horizontal.

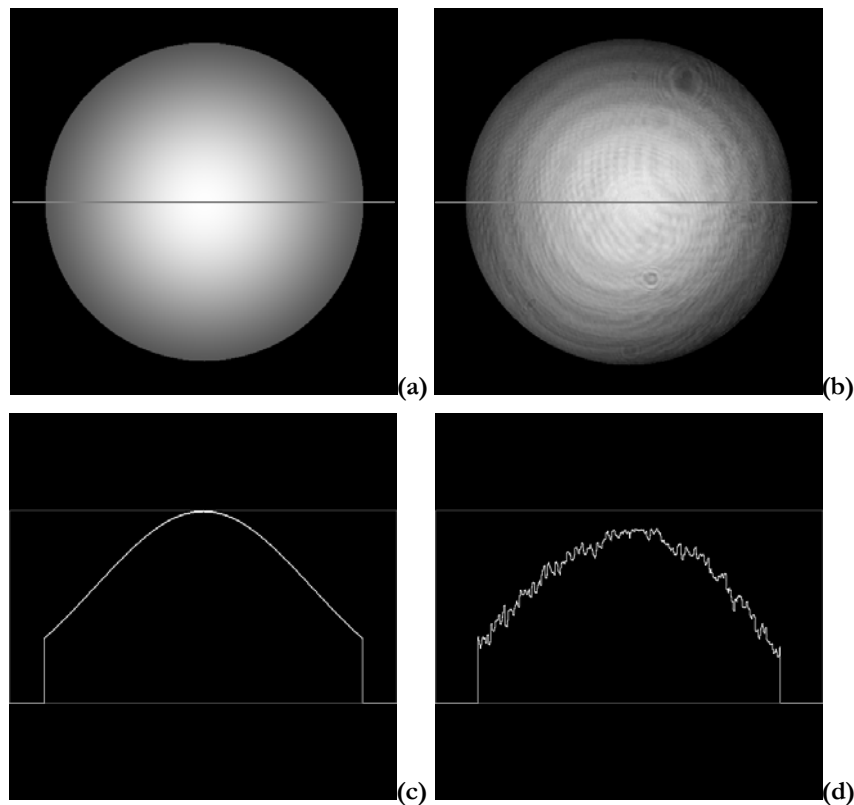


Figura 5- 13 Imagens das frentes de onda (a) ideal e (b) real e dos correspondentes perfis horizontais (c) para a frente de onda ideal e (d) para a frente de onda real.

No entanto, a distribuição de intensidade real da frente de onda é muito próxima da distribuição gaussiana conforme pode ser deduzido a partir da figura 5-14 onde se encontram sobrepostos os perfis para a frente de onda real e para o perfil gaussiano gerado por computador.

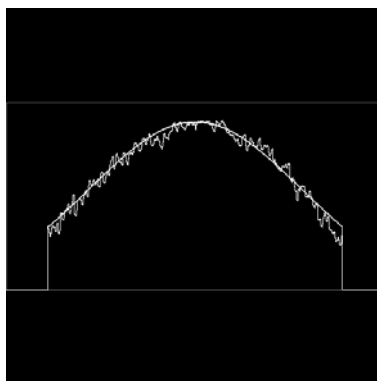


Figura 5-14 Sobreposição dos perfis horizontais correspondentes às frentes de onda ideal e real.

Para se analisar a qualidade da frente de onda relativamente a distorções geradas por imperfeições no sistema óptico, devidas principalmente a imperfeições nas lentes de colimação e de Fourier resultando em efeitos de aberração que distorcem a desejada frente de onda plana, recorreu-se à imagem da distribuição da intensidade da frente de onda real (figura 5-13(c)) gerando-se a sua transformada de Fourier.

Por filtração espacial (filtro passa alto) removeram-se as componentes de ordem zero e as frequências fundamentais, isto é, as componentes de baixa frequência, deixando-se apenas passar as componentes de alta frequência. Ao resultado desta filtração foi aplicada uma transformada inversa de Fourier, sobre a qual se realizou o “unwrapping” da fase, obtendo-se desta forma a função de distribuição de fase associada à frente de onda real. Com esta função de distribuição de fase representou-se a frente de onda real sob a forma pseudo-tridimensional tendo efectuado o mesmo procedimento para a frente de onda ideal (simulação de uma gaussiana truncada). Os resultados destas representações podem ser observados na figura 5-15(a) e (b).

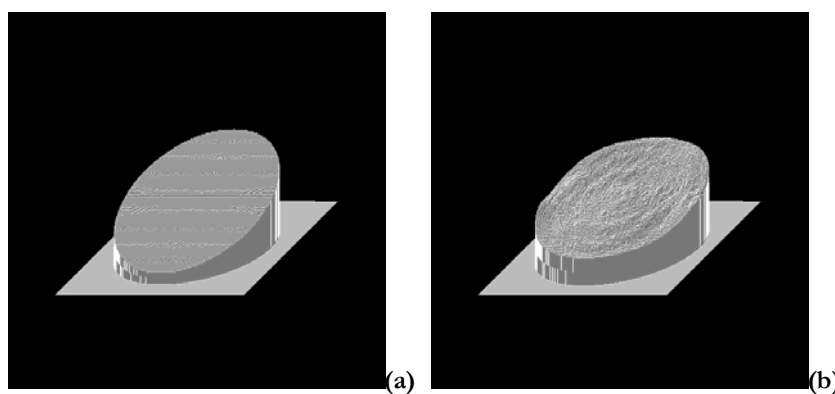


Figura 5- 15 Representações tridimensionais das frentes de onda (a) ideal e (b) real.

Das imagens anteriores observa-se que a frente de onda real apresenta uma distribuição de fase praticamente constante sobre a abertura circular podendo consequentemente ser considerada como uma frente de onda plana.

5.3.4. Sistema de varrimento horizontal/vertical

Funcionamento do sistema

No sistema óptico encontra-se instalado um sistema de aquisição automático de medidas, de grande fiabilidade, para uma melhor caracterização da estrutura da folha de papel. Esse sistema de aquisição tem por base um sistema de varrimento horizontal/vertical. É constituído por uma mesa de deslocamento xy , e pela parte electrónica de controlo dos motores, que está acoplada ao computador através de um programa de controlo específico. A mesa é constituída por dois motores passo a passo ligados por uma correia dentada única à base do suporte da réplica, permitindo a realização de deslocamentos horizontais e/ou verticais relativamente à posição do feixe laser (ver figura 5-16).

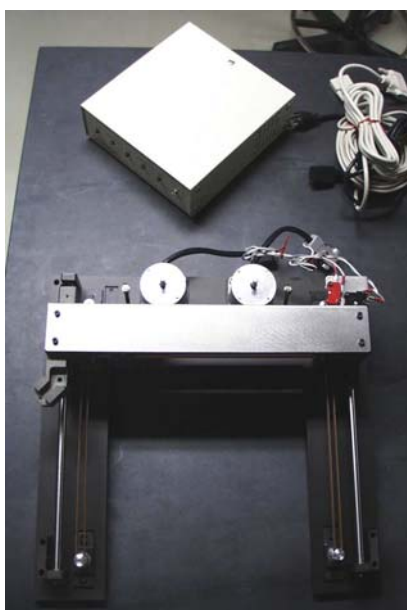


Figura 5-16 Sistema de varrimento horizontal/vertical.

Para colocação das réplicas na mesa xy , foram construídas armações metálicas específicas com as dimensões de $210 \times 210 \text{ cm}^2$ e com uma área activa de trabalho no máximo de $200 \times 200 \text{ cm}^2$ (ver figura 5-17).

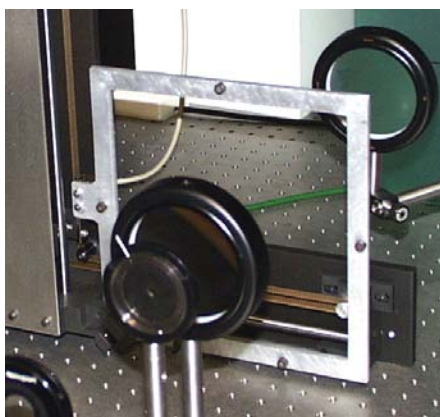


Figura 5-17 Armação metálica para suporte das réplicas.

O sistema de varrimento está inserido no sistema óptico, conforme pode ser observado na figura 5-18, permitindo efectuar varrimentos com um espaçamento controlável linha a linha e para cada linha efectuar a análise da distribuição da orientação das fibras em diferentes posições da réplica. Desse modo, é possível mapear e armazenar em computador os valores da anisotropia e do ângulo de orientação da distribuição de fibras ao longo de toda a réplica, utilizando quer um varrimento sequencial quer um varrimento aleatório.



Figura 5-18 Sistema óptico experimental com o sistema de varrimento incluído.

O programa de controlo específico para este sistema permite:

- Seleccionar a área em que se realiza a análise.
- Efectuar deslocamentos horizontais e verticais com passos entre $38 \mu\text{m}$ (limite de resolução) e 30 mm.
- Seleccionar o modo de funcionamento do sistema: sequencial, aleatório/sequencial e aleatório puro.
- No modo aleatório, seleccionar o número de pontos a analisar por réplica.
- Trabalhar com um feixe laser cujo diâmetro pode variar entre 4 mm e 30 mm.
- Seleccionar o número de imagens adquiridas em cada ponto para determinação da anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras.

Para cada posição, onde se efectua a análise, são adquiridas um número de imagens predeterminadas e antes que a mesa xy se posicione na posição seguinte é realizado o processamento de todas as imagens de modo a obter-se a imagem resultante. Essa imagem é guardada num ficheiro para posterior processamento para determinação do contorno que melhor se adapte ao padrão de difracção. Este processo repete-se para todos os pontos da análise. No final da análise é criado um ficheiro que

contém as coordenadas (x, y) dos pontos analisados e os nomes das imagens resultantes para cada um desses pontos (ver apêndice 1, tabela 5-30).

A esse ficheiro será aplicado um processamento automático sendo desse modo criado um novo ficheiro referente ao papel analisado, com as coordenadas (x, y) dos pontos, a anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras em cada ponto (ver apêndice 1, tabela 5-31).

Os resultados finais do processamento são incluídos num outro ficheiro que inclui os valores médios para a anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras relativo à direcção máquina com os respectivos desvios padrão, o diâmetro do feixe utilizado, o passo entre cada aquisição, o factor de rejeição (factor que permite aceitar ou rejeitar um pixel para o contorno do padrão de difracção), o factor de massagem (*smoth*) aplicado (factor de suavização do contorno do padrão de difracção), os níveis de cinzento inicial e final e as coordenadas dos pontos onde foram realizadas as análises (ver apêndice 1, tabela 5-32).

Para uma melhor visualização dos resultados experimentais, os valores da tabela 5-32 apresentada no apêndice 1, são colocados sob a forma de linhas, cada uma indicando a direcção de desalinhamento e a anisotropia da distribuição de fibras para cada ponto, criando-se deste modo um mapa da folha de papel (ver figura 5-19).

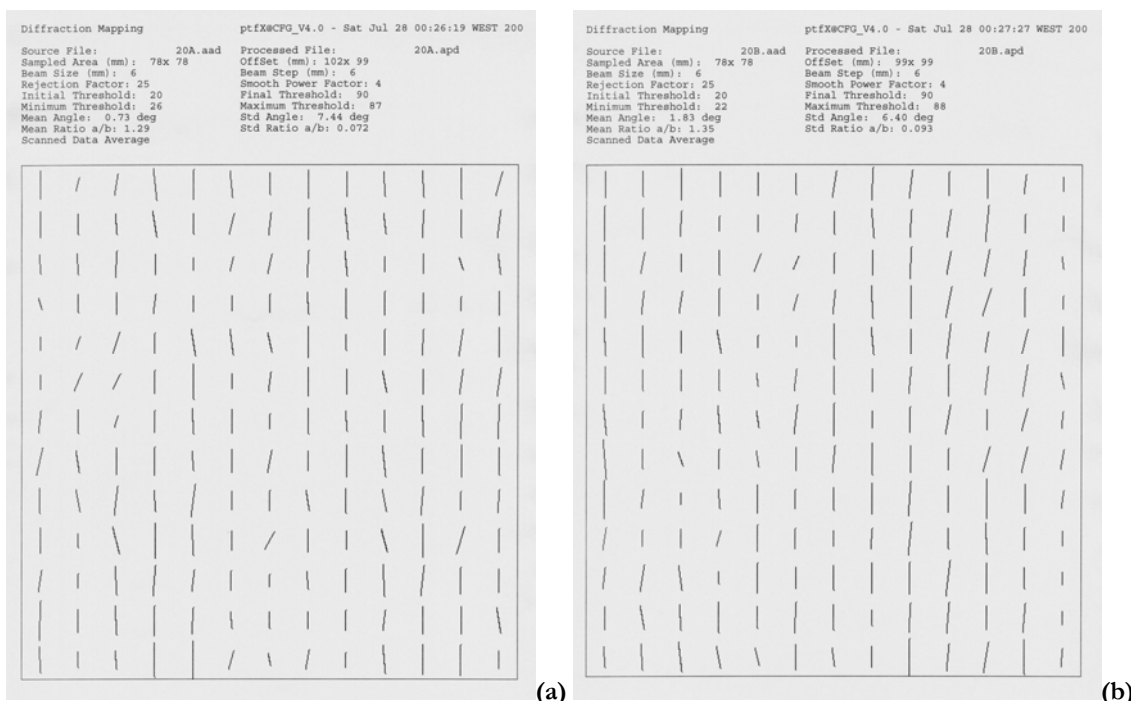


Figura 5-19 Mapas representativos das superfícies de uma folha de papel, (a) face feltro e (b) face teia.

Implementação do sistema

Na primeira fase de implementação do sistema de varrimento horizontal/vertical foi necessário escolher as melhores condições de varrimento a utilizar nas análises das réplicas das superfícies da folha de papel. Assim, realizaram-se uma série de ensaios por forma a estabelecer todos os parâmetros necessários à obtenção de resultados fiáveis, nomeadamente o diâmetro de trabalho do feixe laser, o número de imagens a adquirir para cada ponto de aquisição para minimizar o erro introduzido e o número de aquisições mínimo por réplica, necessário para a obtenção de resultados que estejam dentro dos limites de erro aceitáveis para o sistema quando este funcionar de forma sistemática ou de forma aleatória. Para além destes ensaios realizaram-se ainda outros ensaios com vista à completa caracterização do método da difracção laser, nomeadamente para se quantificar o desvio padrão e a percentagem de erro associado às medições efectuadas.

Para se determinar qual o melhor diâmetro de feixe laser, realizaram-se vários varrimentos sequenciais para a mesma réplica da superfície da folha de papel, variando-se o diâmetro do feixe laser de 4 mm a 20 mm com um passo de 6 mm. Não se realizaram varrimentos para diâmetros do feixe laser inferiores a 4 mm, porque para esses diâmetros os padrões de difracção, que são gerados, não possuem a intensidade suficiente para serem captados pelo *CCD*.

Para cada varrimento efectuaram-se 169 aquisições na superfície da réplica (13 linhas com 13 pontos por linha), tendo sido efectuados quatro varrimentos consecutivos com cada um dos diâmetros seleccionados.

Com os resultados obtidos (ver tabela 5-1) construíram-se dois gráficos, um que representa a variação da anisotropia da distribuição de fibras com o diâmetro do feixe laser e outro que representa a variação do ângulo de orientação da distribuição de fibras com o diâmetro do feixe laser (ver figura 5-20(a) e (b)).

Tabela 5- 1 Valores da anisotropia média e do ângulo de orientação médio da distribuição de fibras para vários diâmetros de iluminação com o feixe de luz laser colimado.

Diâmetro do feixe laser (mm)	Anisotropia média a/b	Ângulo de orientação médio (°)
4	1.73 ± 0.10	1.22 ± 4.30
6	1.64 ± 0.09	2.02 ± 3.33
8	1.58 ± 0.08	2.26 ± 2.93
10	1.59 ± 0.09	1.83 ± 2.49
12	1.58 ± 0.09	1.79 ± 2.33
14	1.57 ± 0.08	1.87 ± 2.30
16	1.54 ± 0.07	1.95 ± 2.31
18	1.52 ± 0.06	2.06 ± 2.31
20	1.53 ± 0.06	1.89 ± 2.13

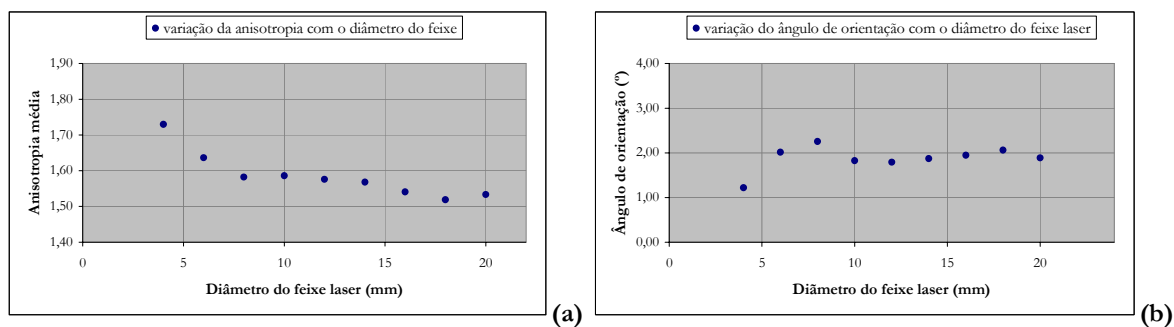


Figura 5- 20 Variações (a) da anisotropia média com o diâmetro do feixe laser e (b) do ângulo de orientação com o diâmetro do feixe laser.

Do gráfico da figura 5-20(a), constata-se que o valor médio para a anisotropia da distribuição de fibras apresenta valores mais elevados para os diâmetros menores (4 e 6 mm) existindo depois uma estabilização, com uma certa tendência para diminuir, para maiores diâmetros do feixe laser.

Comparando os resultados obtidos para a anisotropia da distribuição de fibras pelo método em estudo nesta tese com os resultados obtidos por outros métodos na indústria papelreira, para os mesmos papéis mas para diferentes amostras, verifica-se que os que mais se ajustam são os obtidos com os diâmetros mais pequenos do feixe laser [4, 7].

Relativamente ao gráfico que representa a variação do ângulo de orientação com o diâmetro do feixe (figura 5-20(b)), este não apresenta variações superiores a 1° entre os valores extremos (para os diâmetro de 4 mm e de 8 mm respectivamente), e com excepção do valor obtido com o diâmetro de 4 mm, a variação diminui para aproximadamente metade ($0,5^\circ$).

Em conclusão, embora os resultados para a anisotropia da distribuição de fibras obtidos com o feixe laser de diâmetro 4 mm sejam os que mais se aproximam dos valores obtidos com as outras técnicas, seleccionou-se o diâmetro 6 mm como o melhor diâmetro para feixe. Em primeiro lugar por ser o que apresenta melhor relação entre a intensidade do feixe laser e a forma do padrão de difracção gerado pela réplica. Em segundo lugar, pelo facto de os resultados relativos ao ângulo de orientação para os diâmetros menores (4, 6 e 8 mm) apresentarem para o diâmetro de 6 mm os resultados que mais se aproximam do ângulo de orientação médio.

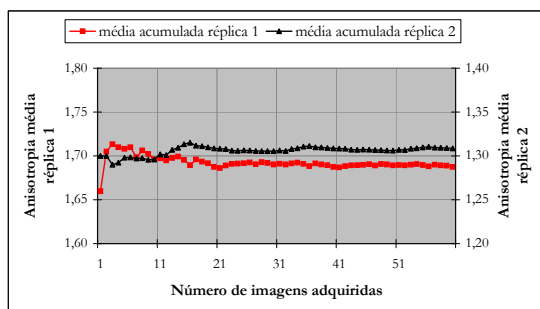
Outro parâmetro a estabelecer é o número de imagens a adquirir e acumular para cada ponto de aquisição. Para se determinar este parâmetro realizaram-se uma série de ensaios consistindo em aquisições consecutivas para um ponto fixo sempre nas mesmas condições sobre duas réplicas, correspondentes a dois papéis diferentes, um com uma anisotropia da distribuição de fibras elevada e outro com uma anisotropia de distribuição de fibras baixa.

Com os resultados obtidos calculou-se a média acumulada para a anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras (ver tabela 5-2, resumo da tabela 5-33 do apêndice 2) e construíram-se os respectivos gráficos. Na figura 5-21(a) e (b) apresentam-se os gráficos da variação da média acumulada

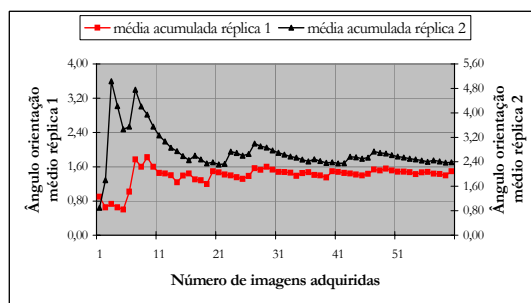
para a anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras em função do número de imagens adquiridas e acumuladas para cada ponto em análise enquanto que na figura 5-21(c) e (d) se apresentam as variações dos respectivos desvios padrão.

Tabela 5- 2 Anisotropia média e ângulo de orientação médio da distribuição de fibras em função do número de imagens adquiridas e acumuladas para o mesmo ponto para duas réplicas diferentes.

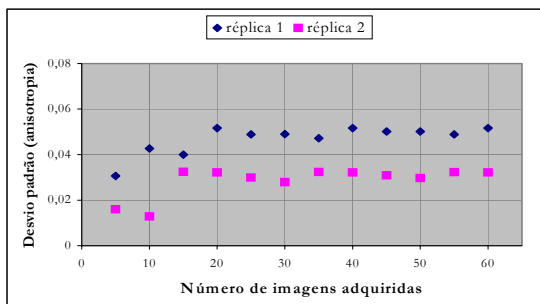
Nº de imagens adquiridas	Réplica 1		Réplica 2	
	Anisotropia média acumulada	Ângulo de orientação médio acumulado	Anisotropia média acumulada	Ângulo de orientação médio acumulado
1	1.66	0.90	1.30	0.90
5	1.71± 0.03	0.6 ± 0.25	1.31± 0.01	3.10 ± 4.37
10	1.70± 0.04	1.60 ± 1.98	1.30± 0.03	2.21 ± 5.08
15	1.70± 0.04	1.39 ± 1.86	1.31± 0.03	1.53 ± 4.28
20	1.69± 0.05	1.50 ± 2.18	1.31± 0.03	0.78 ± 4.07
25	1.69± 0.05	1.32 ± 1.98	1.31± 0.03	1.25 ± 4.24
30	1.69± 0.05	1.53 ± 2.11	1.30± 0.03	1.26 ± 4.49
35	1.69± 0.05	1.45 ± 2.05	1.31± 0.03	1.10 ± 4.18
40	1.69± 0.05	1.50 ± 2.18	1.31± 0.03	0.79 ± 4.07
45	1.69± 0.05	1.40 ± 2.07	1.31± 0.03	1.04 ± 4.17
50	1.69± 0.05	1.52 ± 2.14	1.31± 0.03	1.07 ± 4.33
55	1.69± 0.05	1.47 ± 2.09	1.31± 0.03	0.99 ± 4.14
60	1.69± 0.05	1.50 ± 0.25	1.31± 0.03	0.79 ± 4.07



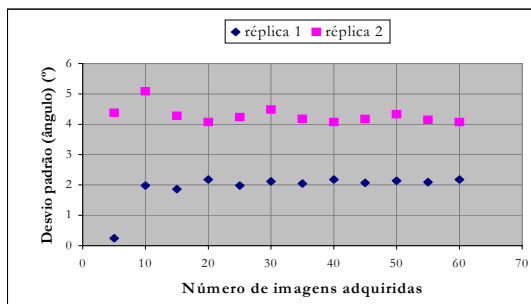
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5- 21 Variação da (a) anisotropia média e (b) do ângulo de orientação e (c) e (d) dos respectivos desvios padrão em função do número de imagens em cada ponto.

Observando os gráficos da figura 5-21(a), (b), (c) e (d) verifica-se que tanto para a anisotropia da distribuição de fibras como para o ângulo de orientação da distribuição de fibras, bem como para os desvios padrão correspondentes, a estabilização da média ocorre para valores superiores a 20 imagens adquiridas e acumuladas por cada ponto em análise. Assim, seleccionou-se o valor de 20 imagens para cada ponto caracterizado (sequencial ou aleatoriamente) como valor de referência ideal para a obtenção de bons resultados para as análises realizadas às superfícies das réplicas.

Depois de conhecido qual o valor de referência para o número de imagens a adquirir para cada ponto, foi necessário quantificar a percentagem de erro associada aos valores da anisotropia da distribuição de fibras e a variação do ângulo de orientação da distribuição das fibras para cada ponto de aquisição. Assim, foram produzidas réplicas correspondentes a duas folhas de papel diferentes e realizou-se a análise para um só ponto da superfície das duas réplicas.

Com o sistema fixo efectuaram-se 20 aquisições para se determinar a anisotropia e o ângulo de orientação da distribuição de fibras, para o mesmo ponto, tendo para cada aquisição sido registadas 20 imagens. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 5-3 (resumo da tabela 5-34 do apêndice 2) e na figura 5-22(a) e (b) sob a forma de gráficos.

Tabela 5- 3 Valores da anisotropia e do ângulo de orientação da distribuição de fibras para o mesmo ponto para duas réplicas diferentes.

Nº de repetições	Réplica 1		Réplica 2	
	Anisotropia a/b	Ângulo de orientação (°)	Anisotropia a/b	Ângulo de orientação (°)
1	1.69	1.30	1.34	0.40
2	1.71	0.90	1.3	0.00
3	1.70	0.90	1.33	0.90
4	1.73	0.00	1.31	0.90
5	1.71	0.40	1.3	1.80
6	1.71	0.40	1.31	0.00
7	1.71	0.40	1.31	0.40
8	1.70	0.40	1.33	1.30
9	1.63	0.00	1.31	0.40
10	1.70	1.30	1.35	0.90
12	1.70	0.40	1.29	0.00
14	1.70	0.90	1.34	0.90
16	1.73	0.40	1.3	0.00
18	1.70	0.00	1.3	0.40
20	1.70	0.40	1.32	1.30
média	1.70	0.49	1.32	0.66

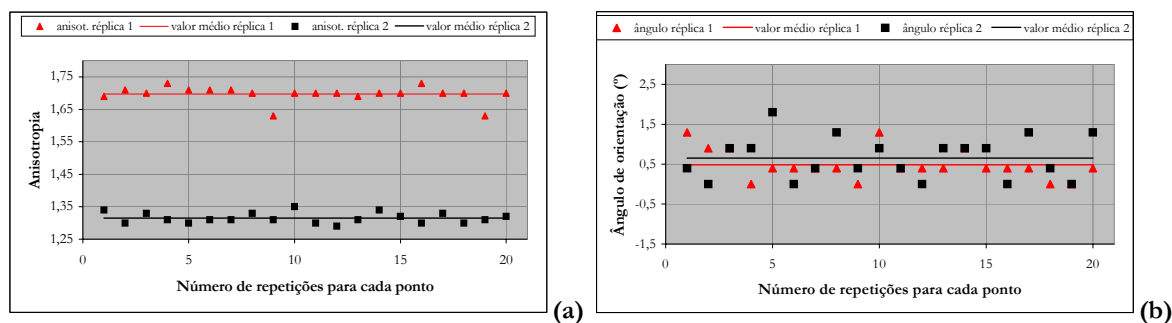


Figura 5- 22 Variação da (a) anisotropia e (b) do ângulo de orientação com o número de repetições para o mesmo ponto para duas réplicas diferentes.

Tal como se pode observar nos gráficos da figura 5-22, que representam a variação das medições da anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras para o mesmo ponto em duas réplicas diferentes, não existem desvios consideráveis relativamente à média. Para a anisotropia da distribuição de fibras, exceptuando 4 medições, todas as outras se situam próximas da linha correspondente ao seu valor médio. Relativamente ao ângulo de orientação da distribuição de fibras, embora as amostras de papel que originaram as réplicas fossem diferentes, com anisotropias de distribuição de fibras médias muito diferentes, apresentavam orientações médias da distribuição de fibras muito próximas com os valores individuais distribuídos em torno da linha que representa o valor médio.

Através dos resultados obtidos observa-se que para a anisotropia da distribuição de fibras o valor máximo para a percentagem de erro referente ao ponto do gráfico mais afastado do valor médio, no caso da réplica 1 é inferior a 4% sendo em média inferior a 0.9% e no caso da réplica 2 é inferior a 2.7% sendo em média inferior a 1.1%. Para o ângulo de orientação da distribuição de fibras para os pontos mais extremos relativamente à linha correspondente ao valor médio do ângulo de orientação da distribuição das fibras surge para a réplica 1 um desvio máximo inferior a 0.9° sendo em média inferior a 0.3° e para a réplica 2 um desvio máximo inferior a 1.2° sendo em média inferior a 0.5°. Estes valores encontram-se compilados na tabela 5-4.

Tabela 5- 4 Valores médios calculados para a anisotropia, percentagem de erro, ângulo de orientação e desvio à média; desvio padrão para a anisotropia média e ângulo de orientação médio; valores máximos para a anisotropia, percentagem de erro, ângulo de orientação e desvio à média; para duas réplicas diferentes.

	Réplica 1				Réplica 2			
	Anisotropia	% erro	Ângulo de orientação	Desvio à média	Anisotropia	% erro	Ângulo de orientação	Desvio à média
Média	1.70	0.87	0.49	0.29	1.32	1.03	0.66	0.46
Desv. padrão	0.02		0.38		0.02		0.52	
Máximo	1.73	3.95	1.30	0.82	1.35	2.62	1.80	1.15

Relativamente ao número de pontos necessário analisar por réplica para que os resultados da anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras estejam dentro de um determinado limite de erro, realizaram-se vários ensaios variando o número de pontos analisados na área predefinida em réplicas de dimensões de formato A4 com o sistema a funcionar sob a forma sistemática e com o sistema funcionar de forma aleatória. Com os resultados obtidos calculou-se a média acumulada para a

anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras (ver tabela 5-5) e construíram-se os respectivos gráficos.

Tabela 5- 5 Médias acumuladas para a anisotropia e ângulo de orientação em função do número de pontos analisados na área predefinida da réplica, em modo sequencial e em modo aleatório.

Nº de pontos analisados	MODO SEQUENCIAL							
	Anisotropia (a/b)				Ângulo de orientação (°)			
	Média acumulada série 1	Média acumulada série 2	Média acumulada série 3	Média acumulada série 4	Média acumulada série 1	Média acumulada série 2	Média acumulada série 3	Média acumulada série 4
1	1.58	1.55	1.71	1.62	7.59	7.59	0.45	3.59
5	1.69	1.62	1.63	1.65	1.70	3.76	2.15	0.99
10	1.65	1.68	1.65	1.67	3.04	2.51	2.96	0.99
20	1.64	1.68	1.66	1.67	1.88	1.93	2.80	0.94
30	1.62	1.68	1.67	1.68	2.46	1.61	2.79	0.88
40	1.63	1.68	1.66	1.68	2.21	1.11	2.08	1.24
50	1.64	1.68	1.66	1.67	2.22	1.07	2.11	1.15
60	1.64	1.66	1.65	1.67	2.22	1.31	2.57	0.96
70	1.65	1.65	1.65	1.66	2.34	1.41	2.43	1.09
80	1.65	1.65	1.64	1.65	2.30	1.34	2.42	1.17
90	1.65	1.64	1.65	1.65	2.14	1.65	2.35	1.31
100	1.64	1.65	1.65	1.65	2.00	1.59	2.14	1.51
110	1.64	1.64	1.64	1.65	2.00	1.83	2.00	1.48
120	1.64	1.64	1.64	1.64	2.09	1.94	2.03	1.49
130	1.64	1.64	1.65	1.64	2.07	1.81	2.04	1.53
140	1.64	1.64	1.65	1.64	2.19	1.89	2.20	1.69
150	1.64	1.64	1.65	1.64	2.18	1.87	2.16	1.77
160	1.64	1.64	1.64	1.64	2.20	1.88	2.19	1.95
169	1.64	1.64	1.64	1.64	2.10	1.86	2.08	2.02
	MODO ALEATÓRIO							
	Anisotropia (a/b)				Ângulo de orientação (°)			
	Média acumulada série 1	Média acumulada série 2	Média acumulada série 3	Média acumulada série 4	Média acumulada série 1	Média acumulada série 2	Média acumulada série 3	Média acumulada série 4
1	1.58	1.57	1.45	1.64	0.45	1.80	4.48	0.45
5	1.60	1.64	1.61	1.70	1.52	2.06	4.12	1.97
10	1.64	1.63	1.64	1.74	1.74	2.73	2.24	2.91
20	1.66	1.64	1.63	1.69	2.30	2.06	3.00	1.97
30	1.67	1.64	1.63	1.66	2.43	2.61	2.51	1.96
40	1.66	1.64	1.63	1.66	2.06	2.55	2.32	1.88
50	1.67	1.63	1.63	1.65	2.26	2.70	1.98	1.82
60	1.67	1.64	1.64	1.65	2.11	2.39	2.06	1.53
70	1.67	1.64	1.64	1.65	2.09	2.40	1.78	1.53
80	1.65	1.65	1.64	1.64	2.12	2.41	1.81	1.25
90	1.65	1.65	1.64	1.64	2.03	2.46	1.82	1.25
100	1.65	1.64	1.64	1.64	2.04	2.51	1.71	1.45
110	1.64	1.64	1.64	1.64	2.03	2.48	1.83	1.44
120	1.64	1.64	1.64	1.64	2.08	2.42	1.77	1.32
130	1.65	1.64	1.64	1.64	2.05	2.37	1.89	1.27
140	1.64	1.64	1.64	1.64	2.02	2.28	1.88	1.35
150	1.64	1.64	1.64	1.64	1.86	2.28	1.83	1.37
160	1.64	1.64	1.64	1.64	1.94	2.33	1.86	1.52
169	1.64	1.64	1.64	1.64	1.92	2.36	1.90	1.44

Na figura 5-23(a), (b), (c) e (d) apresentam-se os gráficos da variação da média acumulada para a anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras em função do número de pontos analisados por réplica para o modo sequencial e para o modo aleatório.

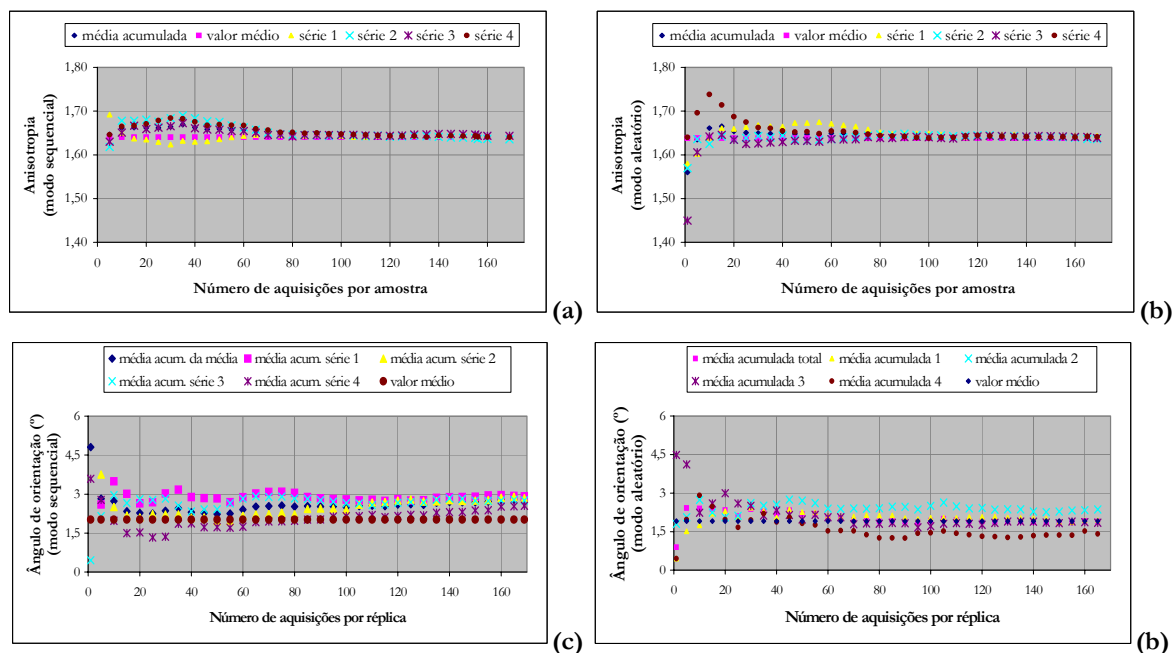


Figura 5- 23 Variação da média acumulada para a anisotropia (a) para o modo sequencial e (b) para o modo aleatório e para o ângulo de orientação (c) para o modo sequencial e (d) para o modo aleatório.

Dos gráficos anteriores (figura 5-23), verifica-se que tanto para a aquisição sequencial como para a aquisição aleatória se dá uma estabilização da média acumulada da anisotropia da distribuição de fibras para valores superiores a 70 pontos analisados por réplica. No entanto, quando se trata do ângulo de orientação da distribuição de fibras, verifica-se que a estabilização se dá, para o modo sequencial, somente para valores superiores a 90 pontos analisados por réplica enquanto que no modo aleatório essa estabilização processa-se muito antes, sensivelmente para valores da ordem de 60 pontos analisados por réplica. Assim, enquanto que no que diz respeito à anisotropia da distribuição de fibras, tanto para o modo sequencial como para o modo aleatório, o número mínimo de pontos a analisar por réplica deve ser de próximo de 80, para o ângulo de orientação da distribuição de fibras, esse valor varia consoante se trata de um varrimento sequencial ou de um varrimento aleatório. Para o modo sequencial o valor de 90 pontos é um valor aceitável enquanto que para o modo aleatório esse valor desce para 60 pontos. Tendo em conta estes resultados seleccionaram-se como valores de referência para o modo sequencial a realização de uma análise com 90 pontos por réplica como mínimo, e para o modo aleatório a realização de uma análise com 70 pontos por réplica como mínimo para réplicas de dimensão de formato A4.

Para caracterizar o sistema de aquisição em relação à fiabilidade e reprodutibilidade dos resultados obtidos realizaram-se uma série de análises sequenciais nas mesmas condições para ambas as superfícies da mesma réplica. Para cada análise efectuaram-se 169 aquisições resultantes do varrimento de 13 linhas com 13 pontos por linha. O número de análises realizadas para cada superfície da réplica foi de 32. Com os resultados experimentais obtidos (ver tabela 5-6, resumo das tabelas 5-35 e 5-36 do

apêndice 2) construíram-se os gráficos referentes à anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras e respectivos desvios padrões. Esses gráficos estão apresentados na figuras 5-24 para a face feltro e em 5-25 para a face teia.

Tabela 5- 6 Valores da anisotropia, ângulo de orientação e respectivos desvios padrão em função do número de varrimentos sequenciais completos para as faces feltro e face teia.

Nº de Repetições	FACE FELTRO			
	Anisotropia		Ângulo de orientação	
	a/b	Desvio padrão	(°)	Desvio padrão (°)
1	1.64	0.02	2.10	3.31
5	1.63	0.37	2.05	3.47
10	1.64	0.23	2.14	3.46
15	1.63	0.13	2.18	3.43
20	1.64	0.03	2.65	3.59
25	1.63	0.23	2.06	3.43
30	1.64	0.01	2.44	3.50
32	1.64	0.26	1.85	3.15
Média	1.64		2.13	
	FACE TEIA			
	Anisotropia		Ângulo de orientação	
	a/b	Desvio padrão	(°)	Desvio padrão (°)
1	1.62	0.11	1.78	3.76
5	1.62	0.11	1.87	3.68
10	1.61	0.11	1.74	3.65
15	1.62	0.11	1.92	3.36
20	1.62	0.11	1.91	3.37
25	1.62	0.10	2.55	3.84
30	1.62	0.10	2.16	3.38
32	1.62	0.10	2.37	4.10
Média	1.62		2.08	

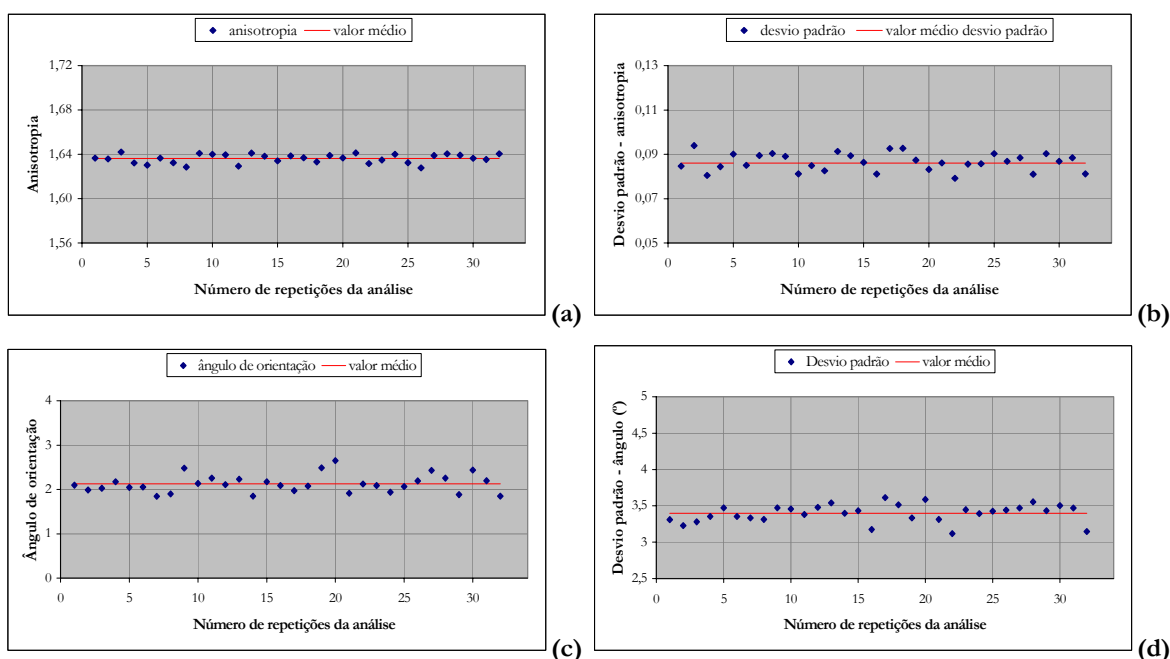


Figura 5- 24 variação da anisotropia, do ângulo de orientação e dos correspondentes desvios padrão para a mesma superfície da réplica (face feltro).

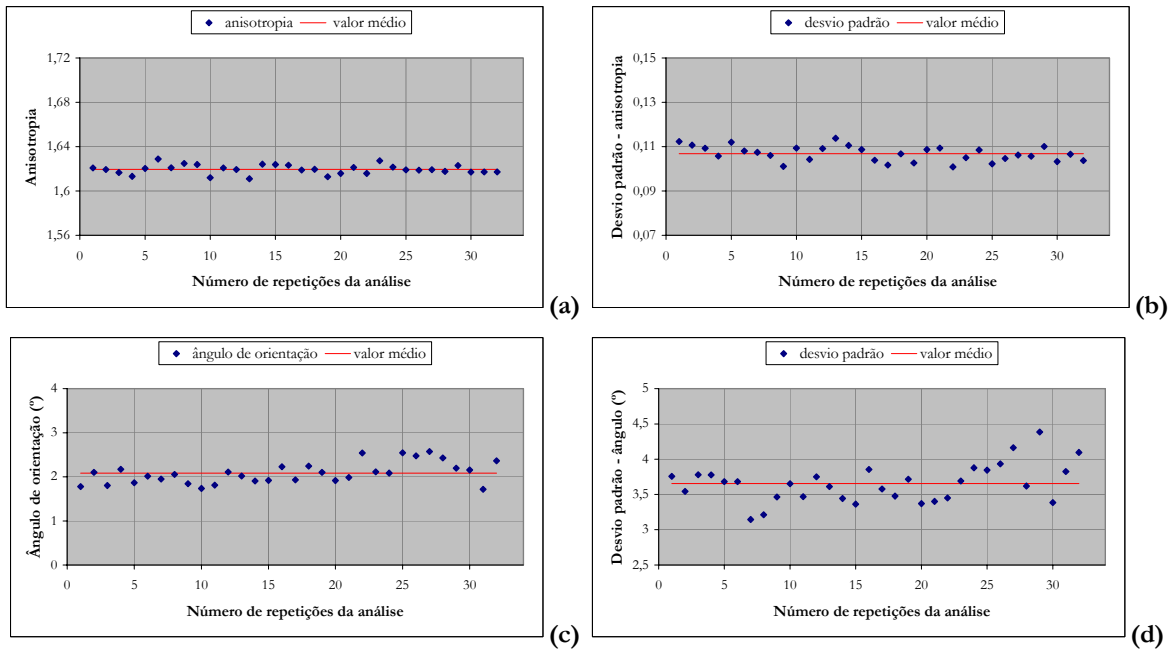


Figura 5- 25 Variação da anisotropia, do ângulo de orientação e dos correspondentes desvios padrão para a mesma superfície da réplica (face teia).

Tal como se pode observar nos gráficos apresentados nas figuras 5-24 e 5-25, os resultados para a anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras para ambas as faces da folha de papel distribuem-se em torno dos seus valores médios não existindo grandes desvios relativamente às médias.

Para a face feltro a maior variação da anisotropia da distribuição de fibras relativamente à média é de 0.008 correspondendo a uma percentagem de erro inferior a 0.5% e para a face teia a variação máxima é de 0.013 correspondendo a uma percentagem de erro de 0.8%.

Relativamente ao ângulo de orientação os desvios máximos em relação à média são tanto para a face feltro como para a face teia de 0.5°.

Os desvios padrão apresentados nas figuras 5-24(b) e (d) e 5-25(b) e (d), mostram que após se efectuarem as 32 análises se encontram distribuídos em torno da média, sendo de 0.09 e 0.11 para a anisotropia da distribuição de fibras e de 3.40° e 3.66° para o ângulo de orientação da distribuição de fibras, para as faces feltro e teia, respectivamente.

Tendo em consideração os resultados obtidos pode concluir-se que os desvios observados relativamente à média tanto para a anisotropia como para o ângulo de orientação da distribuição de fibras, são praticamente iguais para as duas faces da réplica (feltro e teia) existindo uma variação da anisotropia da distribuição de fibras ligeiramente superior para a face teia que se traduz numa percentagem de erro também ligeiramente superior.

Os resultados dos desvios padrão obtidos para a anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras para ambas as faces da réplica reforçam as conclusões anteriores visto apresentarem valores muito semelhantes para ambas as faces, nomeadamente 0.09 e 0.11 para a anisotropia da distribuição de fibras e 3.40° e 3.66° para o ângulo de orientação da distribuição de fibras, para a face feltro e teia, respectivamente.

A maior variação nos valores da anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras verificada para a face teia, é resultante da turbulência existente durante a formação da parte da folha de papel que está em contacto com a teia da máquina de papel. Na figura 5-26(a) e (b) apresenta-se a anisotropia da distribuição de fibras correspondente às superfícies das duas réplicas das faces da folha de papel.

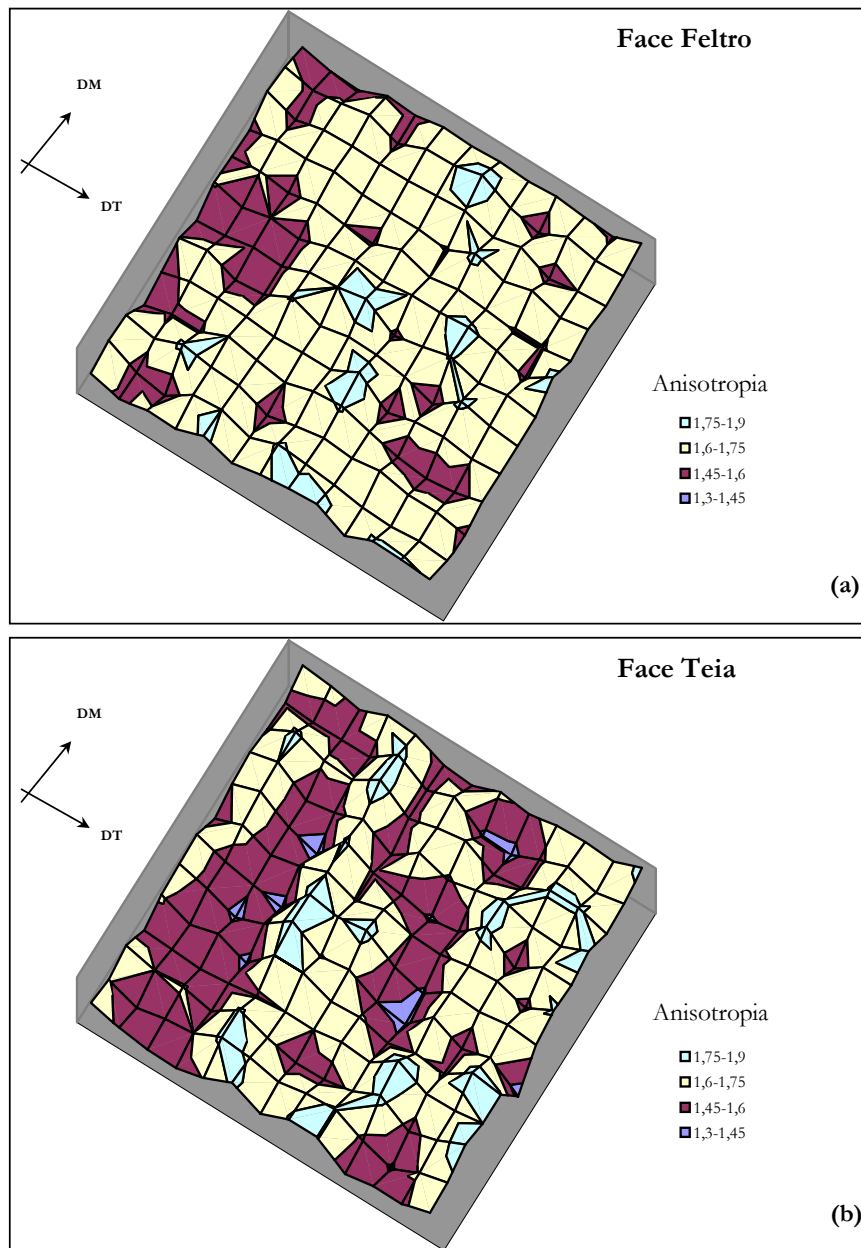


Figura 5- 26 Distribuição da anisotropia para as superfícies da réplica da folha de papel (a) face feltro e (b) face teia.

5.4 Resultados experimentais

Esta secção vai ser dedicada à apresentação dos resultados experimentais, obtidos com o método óptico de análise implementado, para caracterização da folha de papel por difracção da luz laser através de réplicas das superfícies da folha de papel. Com esta finalidade obtiveram-se padrões de difracção das superfícies das réplicas da folha de papel com os quais se quantificou a anisotropia e o ângulo de orientação preferencial da distribuição das fibras para cada um dos pontos das superfícies da referida folha obtendo-se a distribuição global de orientação das fibras para a totalidade das folhas.

Para cada ponto da superfície da réplica onde se realizou a aquisição foi gerado um padrão de difracção tendo sido caracterizada a anisotropia da distribuição de fibras através da elipticidade do contorno desse padrão, isto é, da razão entre os comprimentos dos eixos maior e menor (a/b) do contorno que envolve o referido padrão e o ângulo de orientação preferencial da distribuição das fibras caracterizado através do ângulo do eixo maior do contorno relativamente à direcção máquina do fabrico do papel.

Diferentes amostras de papéis, industriais e produzidos em laboratório, foram analisados com o método óptico experimental apresentado tendo sido obtida a caracterização completa das suas superfícies através de mapas da orientação das fibras.

Réplicas das superfícies das amostras de papel foram produzidas utilizando o procedimento descrito na secção 5.3-1. O sistema óptico experimental foi ajustado para a realização de varrimentos sequenciais no plano xy sobre uma área predefinida que pode ir até $200 \times 200 \text{ mm}^2$. O diâmetro de trabalho do feixe laser seleccionado foi de 6 mm, pelas razões apresentadas na secção 5.3-4, com um passo de varrimento também de 6 mm para uma completa análise da superfície da réplica. Para cada ponto analisado foram adquiridas 20 imagens, também pelo exposto na secção 5.3-4. Para além disso e para cada uma das superfícies da réplica foram efectuados quatro varrimentos por forma a poder calcular-se a elipticidade média e a orientação média das fibras para cada ponto bem como, para calcular a elipticidade média global e a orientação média global das fibras na totalidade da amostra.

O número de pontos a analisar está dependente das dimensões da área da amostra sendo de 1024 para réplicas de dimensão de formato A4, correspondendo a 32 linhas a 32 pontos por linha. Como para cada ponto analisado a imagem (padrão de difracção) adquirida ocupa 256 kbytes de memória, a totalidade de memória ocupada pelos quatro varrimentos para as réplicas de maiores dimensões é de $256 \times 1024 \times 4 = 1.048 \text{ Mb} = 1 \text{ Gb}$. O tempo de realização dos quatro varrimentos é de 30 minutos para as réplicas de $100 \times 100 \text{ mm}^2$ e de 3 horas para as réplicas de $200 \times 200 \text{ mm}^2$.

No final da análise é criado um ficheiro constituído pelas coordenadas e nomes das imagens obtidas para cada ponto, conforme indicado na secção 5.3-4. A esse ficheiro é aplicado um algoritmo de

processamento por forma a analisar cada distribuição de intensidade dos padrões de difracção e encontrar o melhor contorno de igual intensidade calculando em alguns segundos o valor da sua elipticidade (a/b) e a orientação do seu eixo maior relativamente à direcção máquina do fabrico do papel (DM).

As imagens das distribuições de intensidade dos padrões de difracção são imagens digitais de 512×512 pixels com 8 bits por pixel. Nestas condições, a intensidade luminosa do padrão de difracção está quantificada entre o valor 0 (preto) e 255 (branco).

Em primeiro lugar e para cada padrão de difracção o algoritmo de processamento identifica ao longo de todas as diagonais do padrão, de 0° a 180° , os pixels que possuem uma mesma distribuição de intensidade. Para isso são definidos os níveis de threshold de intensidade inicial (normalmente 10) e final (normalmente 128) e um factor de rejeição de 25, que significa que quando um pixel é identificado com um determinado nível de threshold ele é aceite como válido para o contorno desde que nos 25 pixels seguintes dessa diagonal não exista outro pixel com o mesmo nível de threshold. Assim, após o varrimento de todas as diagonais é possível obter um contorno em que todos os pontos (pixels) desse contorno possuem a mesma intensidade. Posteriormente esse contorno é suavizado através de um algoritmo de massagem com um factor de potência 4, numa escala de 1 (sem massagem) a 10 (com massagem máxima).

Em seguida, e após determinação de todos os contornos entre o threshold inicial e final é determinado o contorno médio de todos os contornos. Depois são determinados os erros quadráticos médios entre todos os contornos e o contorno médio e são determinados os ângulos entre os correspondentes eixos maior e menor. O contorno seleccionado é o que apresentar o menor erro quadrático médio relativamente ao contorno médio e apresentar o ângulo entre eixos que mais se aproxime de 90° . A partir deste contorno seleccionado é determinado a sua elipticidade (razão entre os comprimentos do eixo maior e menor do contorno) que se associa à anisotropia da distribuição de fibras e o ângulo do eixo maior do contorno que se associa ao ângulo de orientação da distribuição de fibras.

Com os valores obtidos para a elipticidade (a/b) e para o ângulo de orientação preferencial das fibras cria-se um novo ficheiro no qual se inclui as coordenadas correspondentes aos pontos onde foi efectuado o varrimento. Os resultados finais do processamento são incluídos num outro ficheiro onde são indicados os valores médios para a anisotropia e para o ângulo de orientação da distribuição de fibras relativo à direcção máquina com os respectivos desvios padrão, bem como todos os outros parâmetros referentes às condições em que foi realizado o varrimento e o processamento posterior (tal como apresentado na secção 5.3-4).

Estes resultados são depois posicionados no ponto correspondente às suas coordenadas criando-se deste modo um mapa da folha de papel cujo cabeçalho inclui toda a informação sobre as condições do varrimento efectuadas e sobre os resultados médios globais (anisotropia e ângulo de orientação da

distribuição de fibras e respectivos desvios padrões). Este mapa apresenta para cada ponto analisado da superfície da réplica um segmento de recta cujo comprimento é proporcional à anisotropia da distribuição de fibras e cuja inclinação corresponde ao ângulo de orientação da distribuição de fibras nesse ponto. Com este mapa é possível efectuar-se a identificação de variações locais na distribuição de orientação das fibras, bem como identificar variações da anisotropia de distribuição das fibras.

De seguida vai-se proceder à apresentação e discussão dos resultados experimentais obtidos com o sistema a funcionar nas condições acima mencionadas para um conjunto alargado de amostras de folhas de papel. Este conjunto consiste em papéis isotrópicos e anisotrópicos produzidos em diferentes laboratórios, papéis comuns de impressão e papéis kraft liner industriais.

Uma série de 5 papéis com referências 363 15, 363 16, 363 18, 363 19 e 363 20 (série *EFPG-1975*)[19], com graus de anisotropia da distribuição de fibras variável fabricados numa máquina de papel piloto foram cedidos pela Escola Francesa de Papelaria do Instituto Nacional Politécnico de Grenoble (*EFPG-INPG-França*). Esses papéis que contêm fibras coloridas (0.25%) como marcadores, são utilizados desde há alguns anos em diferentes laboratórios de todo o mundo e constituem uma referência internacional para os estudos de orientação das fibras no papel. As amostras cedidas pelo *EFPG* tinham as dimensões de 100×100 mm². Foram também analisadas amostras de folhas de papel produzidas nos laboratórios do Departamento de Ciência e Tecnologia do Papel (pinho e eucalipto isotrópicos), bem como papéis de impressão de 80 e 100 gm⁻² e papéis kraft liner de 125 gm⁻² industriais.

Para cada amostra de papel produziu-se uma réplica com ambas as superfícies da amostra para se assegurarem iguais condições na produção de réplicas de ambas as superfícies. As réplicas assim produzidas foram depois colocadas no caixilho de alumínio fixo à mesa de deslocamento xy que se encontra inserida no sistema óptico implementado. Para cada réplica foram geradas e adquiridas as imagens das distribuições de intensidade dos padrões de difracção para cada ponto do varrimento efectuado. O sistema óptico funcionou de acordo com as condições descritas no início desta secção.

Papel produzido numa máquina piloto referência 363 15

Duas imagens típicas das distribuições de intensidade, dos padrões de difracção, obtidas com o sistema óptico estão apresentadas na figura 5-27(a) e (b) para cada uma das duas superfícies das folhas de papel ref. 363 15 (face feltro e face teia), respectivamente.

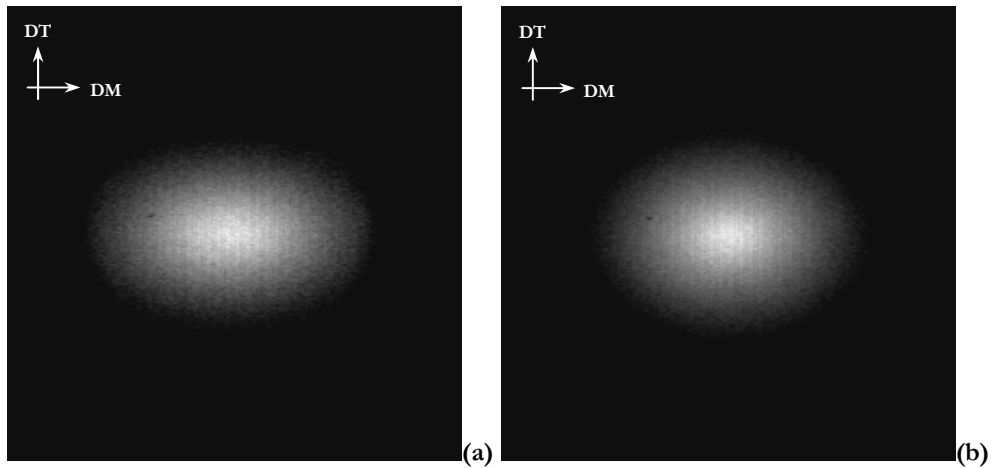


Figura 5- 27 Padrões de difracção típicos gerados com as réplicas das superfícies do papel ref. 363 15 para (a) face feltro e (b) face teia.

Aplicando o algoritmo anteriormente descrito às imagens dos padrões de difracção da figura 5-27 obtêm-se as imagens apresentadas na figura 5-28(a) e (b). Na tabela 5-7 encontram-se registados os valores da anisotropia e do ângulo de orientação da distribuição de fibras para os padrões de difracção apresentados na figura 5-28. O contorno que melhor se adapta aos padrões de difracção está sobreposto às imagens para melhor visualização dos resultados.

Como resultado da análise efectuada à amostra através de um varrimento sequencial xy foram criados dois mapas representativos das superfícies da folha de papel, onde cada segmento representa um ponto analisado. Conforme já foi referido o comprimento de cada segmento é proporcional à anisotropia local da distribuição de fibras e a sua direcção determina a orientação local da distribuição de fibras nesse ponto.

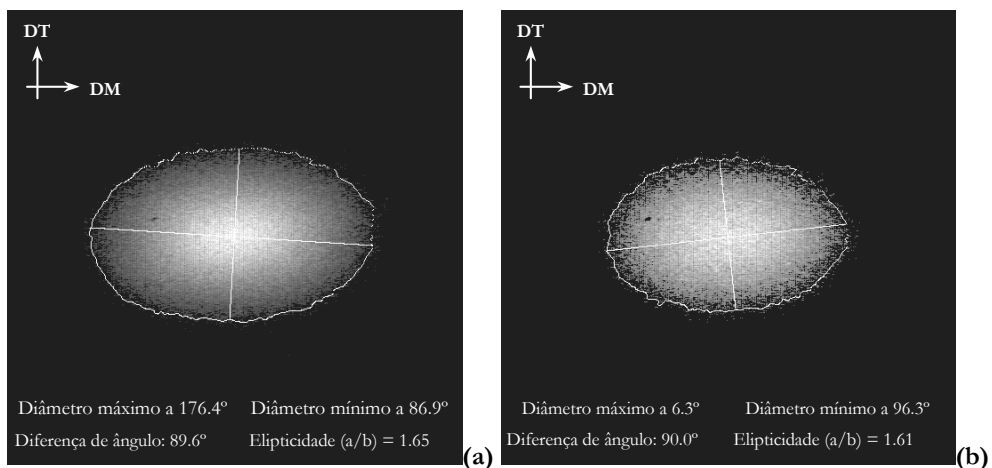


Figura 5- 28 Resultados da aplicação do algoritmo específico a dois padrões de difracção obtidos para o papel ref. 363 15 (a) face feltro e (b) face teia.

Tabela 5- 7 Anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras dos padrões de difracção da figura 5-28 (papel 363 15 face feltro e face teia).

Papel 363 15	Anisotropia	Ângulo (°)
Face Feltro	1.66	-5.60
Face Teia	1.61	6.30

Os resultados globais obtidos para a amostra de papel ref. 363 15 estão sintetizados na tabela 5-8 e apresentados figura 5-29(a) e (b), onde se podem observar os mapas correspondentes aos varrimentos completos da réplica para as superfícies feltro e teia do papel sobre uma área de 78x78 mm².

Tabela 5- 8 Resultados globais da anisotropia média e ângulo de orientação médio da distribuição de fibras para o papel 363 15, face feltro e face teia.

Papel 363 15	Anisotropia média	Ângulo médio (°) (valor absoluto)
Face Feltro	1.66 ± 0.07	0.77 ± 1.92
Face Teia	1.57 ± 0.07	1.01 ± 1.83

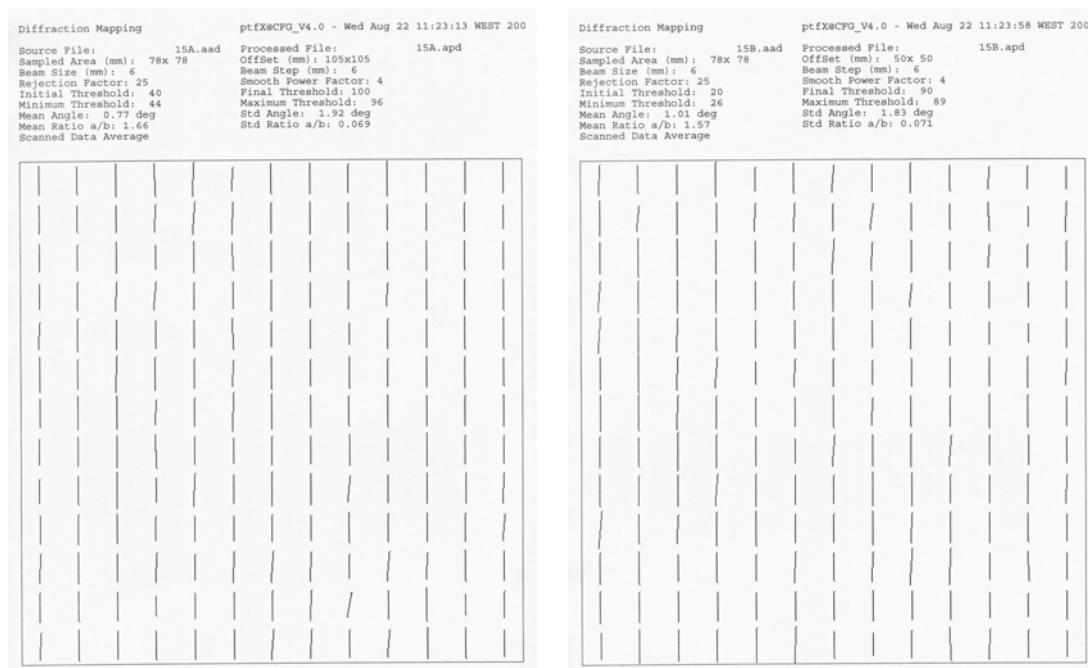


Figura 5- 29 Mapas das superfícies do papel ref. 363 15 (a) face feltro e (b) face teia.

A partir dos resultados da figura 5-29(a) e (b) torna-se evidente que existem diferenças na anisotropia média da distribuição de fibras entre as duas superfícies da folha de papel, sendo a superfície superior (face feltro) mais anisotrópica - 1.66, que a superfície inferior (face teia) que apresenta uma anisotropia média de 1.57. Relativamente à orientação da distribuição de fibras constata-se que as fibras em ambas as superfícies se encontram bem alinhadas relativamente na direcção máquina (*DM*). Observando os mapas não se identificam variações locais de orientação na distribuição de fibras.

Papel produzido numa máquina piloto referência 363 16

Em dois pontos das superfícies das folhas de papel 363 16 os resultados obtidos (ver tabela 5-9) com o algoritmo descrito estão apresentados na figura 5-30(a) e (b) para a face feltro e face teia, respectivamente. O contorno que melhor se adapta sobreposto a cada uma das imagens dos padrões de difracção para efeitos de amostragem.

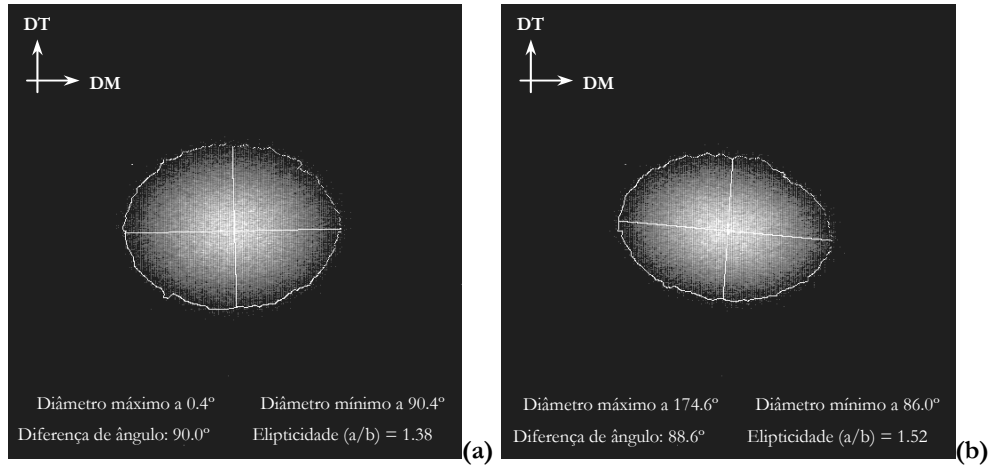


Figura 5- 30 Resultados da aplicação do algoritmo específico a dois padrões de difracção obtidos para o papel ref. 363 16 (a) face feltro e (b) face teia.

Tabela 5- 9 Anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras dos padrões de difracção da figura 5-30 (papel 363 16 face feltro e face teia).

Papel 363 16	Anisotropia	Ângulo (°)
Face Feltro	1.38	-0.73
Face Teia	1.52	1.46

Como resultado da análise efectuada à amostra de papel através de um varrimento sequencial *xy* foram criados dois mapas representativos das superfícies da folha de papel, onde cada segmento representa um ponto analisado.

Os resultados globais obtidos para a amostra de papel ref. 363 16 estão sintetizados na tabela 5-10 e apresentados na figura 5-31(a) e (b), onde se observam os mapas correspondentes aos varrimentos completos da réplica para as superfícies feltro e teia do papel sobre uma área de 72x78 mm².

Tabela 5- 10 Resultados globais da anisotropia média e ângulo de orientação médio da distribuição de fibras para o papel 363 16, face feltro e face teia.

Papel 363 16	Anisotropia média	Ângulo médio (°) (valor absoluto)
Face Feltro	1.41 ± 0.07	0.73 ± 2.95
Face Teia	1.53 ± 0.09	1.46 ± 3.25

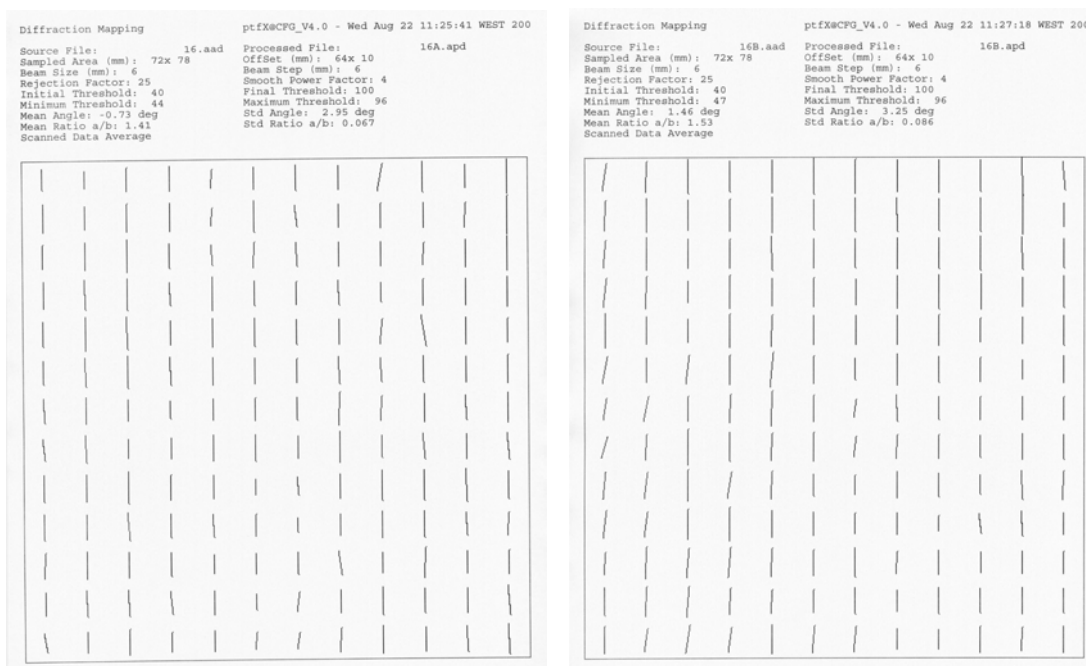


Figura 5- 31 Mapas das superfícies do papel ref. 363 16 (a) face feltro e (b) face teia.

A partir dos resultados da figura 5-31(a) e (b) observa-se que existem diferenças na anisotropia média da distribuição de fibras entre as duas superfícies da folha de papel, sendo a superfície superior (face feltro) menos anisotrópica - 1.41, que a superfície inferior (face teia) que apresenta uma anisotropia média de 1.53. Relativamente à orientação das fibras constata-se que as fibras em ambas as superfícies se encontram alinhadas segundo a *DM* existindo algumas variações locais de orientação da distribuição de fibras em especial na face teia.

Papel produzido numa máquina piloto referência 363 18

Os resultados obtidos em dois pontos das superfícies das folhas de papel ref. 363 18 estão apresentados na figura 5-32(a) e (b) e na tabela 5-11, com o contorno que melhor se adapta sobreposto a cada uma das imagens para melhor visualização.

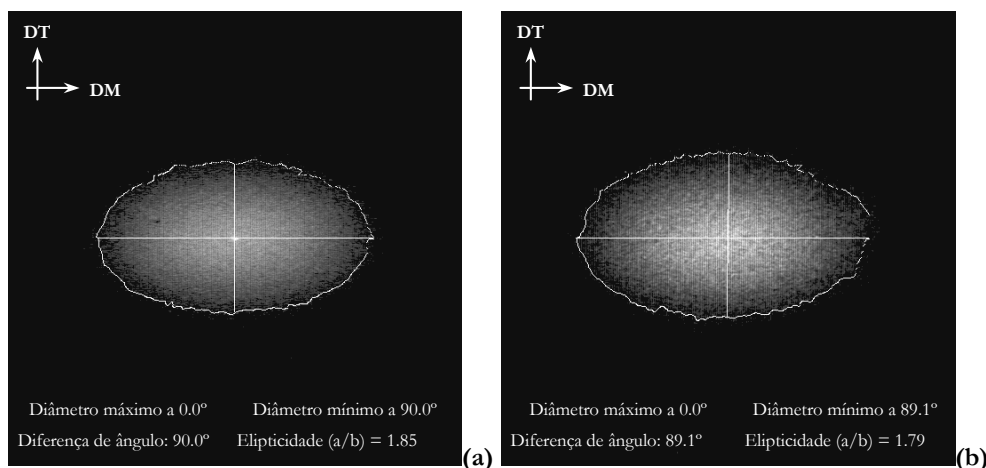


Figura 5- 32 Resultados da aplicação do algoritmo específico a dois padrões de difração obtidos para o papel ref. 363 18 (a) face feltro e (b) face teia.

Tabela 5- 11 Anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras dos padrões de difracção da figura 5-32 (papel 363 16 face feltro e face teia).

Papel 363 18	Anisotropia	Ângulo (°)
Face Feltro	1.85	0.00
Face Teia	1.79	0.00

Como resultado da análise efectuada à amostra de papel através de um varrimento sequencial *xy* foram criados dois mapas representativos das superfícies da folha de papel, onde cada segmento representa um ponto analisado. Os resultados globais obtidos para a amostra de papel ref. 363 18 estão sintetizados na tabela 5-12 e apresentados na figura 5-33(a) e (b), onde se observam os mapas correspondentes aos varrimentos completos da réplica para as superfícies feltro e teia do papel sobre uma área de 78x78 mm².

Tabela 5- 12 Resultados globais da anisotropia média e ângulo de orientação médio da distribuição de fibras para o papel 363 18, face feltro e face teia.

Papel 363 18	Anisotropia média	Ângulo médio (°) (valor absoluto)
Face Feltro	1.74 ± 0.09	1.31 ± 1.94
Face Teia	1.70 ± 0.07	0.13 ± 1.52

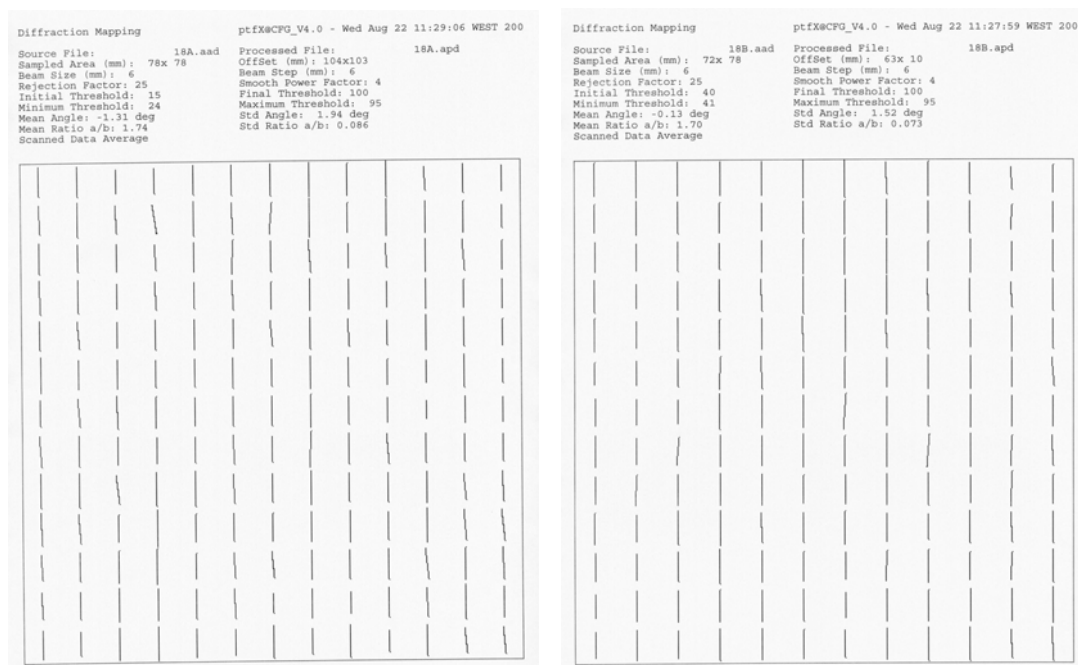


Figura 5- 33 Mapas das superfícies do papel ref. 363 18 (a) face feltro e (b) face teia.

Tal como para o papel ref. 363 15 os resultados da figura 5-33(a) e (b) indicam a existência de diferenças na anisotropia média da distribuição de fibras entre as duas superfícies da folha de papel, sendo a

superfície superior (face feltro) ligeiramente mais anisotrópica - 1.74, que a superfície inferior (face teia) que apresenta uma anisotropia média de 1.70. Relativamente à orientação das fibras constata-se que as fibras em ambas as superfícies se encontram bem alinhadas relativamente à *DM* não se observando nos mapas variações locais significativas de orientação da distribuição de fibras.

Papel produzido numa máquina piloto referência 363 19

Para as duas superfícies das folhas de papel ref. 363 19 os resultados obtidos em dois pontos são apresentados na figura 5-34(a) e (b) e na tabela 5-13, com o contorno que melhor se adapta está sobreposto a cada uma das imagens.

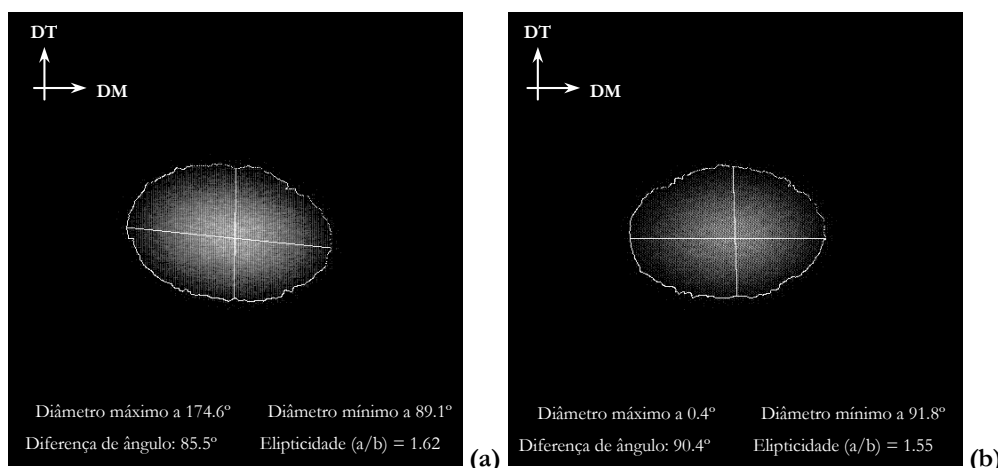


Figura 5- 34 Resultados da aplicação do algoritmo específico a dois padrões de difracção obtidos para o papel ref. 363 19 (a) face feltro e (b) face teia.

Tabela 5- 13 Anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras dos padrões de difracção da figura 5-34 (papel 363 19 face feltro e face teia).

Papel 363 19	Anisotropia	Ângulo (°)
Face Feltro	1.62	-5.40
Face Teia	1.55	0.40

Do varrimento sequencial *xy* foram criados dois mapas representativos das superfícies da folha de papel que estão apresentados nas figuras 5-35(a) e (b). A área varrida foi de 72x78 mm². Os resultados globais obtidos para a amostra de papel ref. 363 19 estão sintetizados na tabela 5-14.

Tabela 5- 14 Resultados globais da anisotropia média e ângulo de orientação médio da distribuição de fibras para o papel 363 19, face feltro e face teia.

Papel 363 19	Anisotropia média	Ângulo médio (°) (valor absoluto)
Face Feltro	1.60 ± 0.11	0.29 ± 2.69
Face Teia	1.54 ± 0.08	6.07 ± 4.31

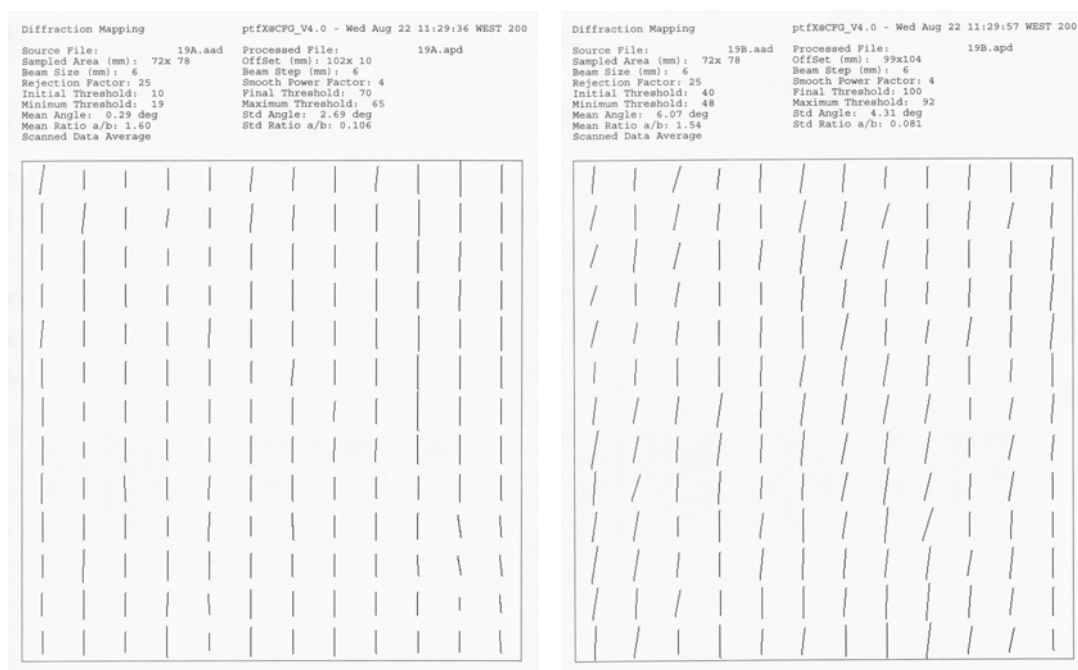


Figura 5- 35 Mapas das superfícies do papel ref. 363 19 (a) face feltro e (b) face teia.

A partir dos resultados da figura 5-35(a) e (b) torna-se evidente que embora não exista uma diferença significativa de anisotropia média da distribuição de fibras entre as duas superfícies da folha de papel, a face feltro mais anisotrópica com uma anisotropia média de 1.60 e a face teia menos anisotrópica com uma anisotropia média de 1.54. Existe uma grande diferença entre a orientação média da distribuição de fibras na face feltro e na face teia. Enquanto que para a face feltro as fibras se encontram bem alinhadas segundo a *DM* com poucos desvios locais, para a face teia existe uma orientação da distribuição de fibras predominantemente segundo um ângulo de aproximadamente 6° relativamente à *DM* da folha de papel. Para esta face o desvio padrão relativo ao ângulo tem um valor bastante elevado resultante das grandes variações na orientação da distribuição de fibras existentes nessa superfície da folha de papel, como se pode constatar no mapa da figura 5-35(b). Folhas de papel que possuam estas características apresentam normalmente problemas relacionados com a instabilidade dimensional da folha, bem como problemas de impressão.

Papel produzido numa máquina piloto referência 363 20

Os resultados obtidos em dois pontos das superfícies das folhas de papel 363 20 estão apresentados na figura 5-36(a) e (b) e na tabela 5-15. O contorno que melhor se adapta está sobreposto a cada uma das imagens dos padrões de difracção.

Tabela 5- 15 Anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras dos padrões de difracção da figura 5-34 (papel 363 19 face feltro e face teia).

Papel 363 20	Anisotropia	Ângulo (°)
Face Feltro	1.30	-0.40
Face Teia	1.33	0.00

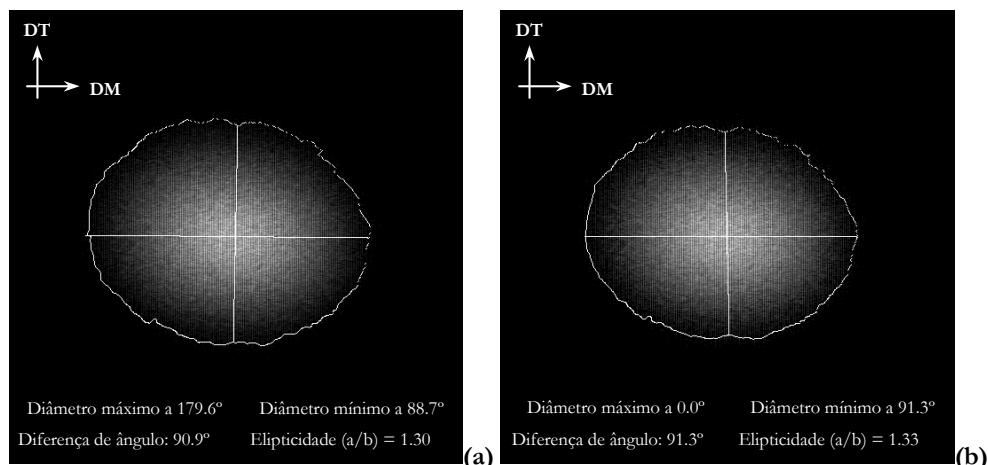


Figura 5- 36 Resultados da aplicação do algoritmo específico a dois padrões de difracção obtidos para o papel ref. 363 20 (a) face feltro e (b) face teia.

Como resultado da análise sequencial efectuada à amostra de papel, foram criados dois mapas representativos das superfícies da folha de papel (ver figuras 5-37(a) e (b)). A área varrida foi de 78x78 mm². Os resultados globais para a amostra de papel ref. 363 20 estão sintetizados na tabela 5-16.

Tabela 5- 16 Resultados globais da anisotropia média e ângulo de orientação médio da distribuição de fibras para o papel 363 20, face feltro e face teia.

Papel 363 20	Anisotropia média	Ângulo médio (°) (valor absoluto)
Face Feltro	1.29 ± 0.07	0.73 ± 7.44
Face Teia	1.35 ± 0.09	1.83 ± 6.40

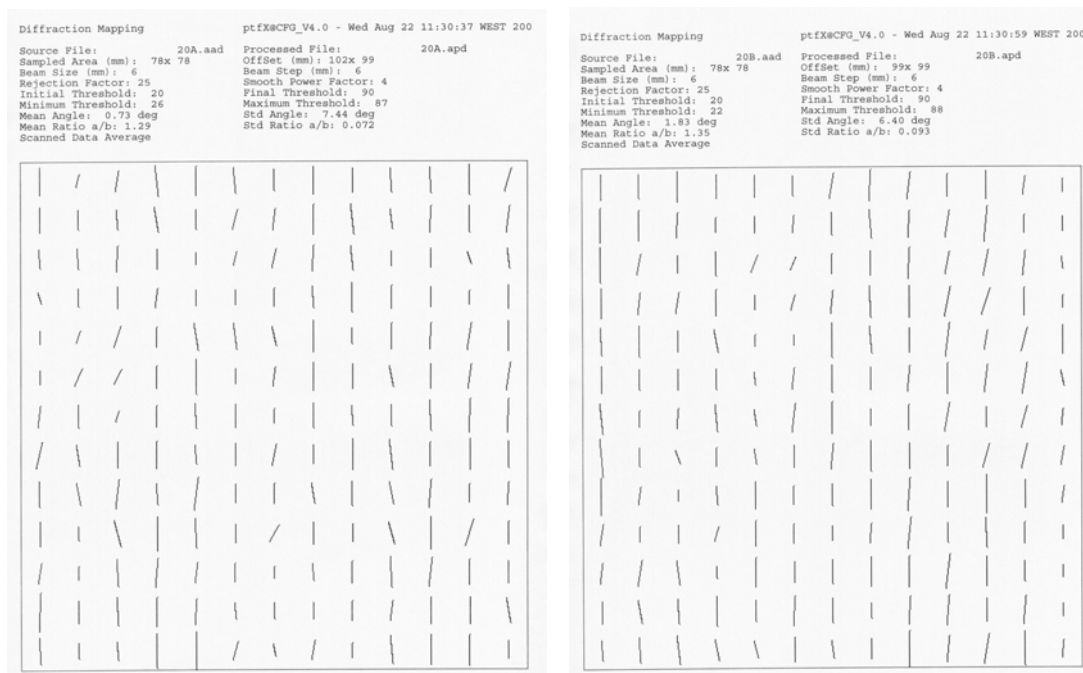


Figura 5- 37 Mapas das superfícies do papel 363 20 (a) face feltro e (b) face teia.

A partir dos resultados da figura 5-37(a) e (b) torna-se evidente que existe uma inversão na relação entre as anisotropias médias das distribuições de fibras das duas superfícies da folha de papel, embora a diferença de anisotropia da distribuição de fibras entre elas não seja muito significativa, a face feltro menos anisotrópica com uma anisotropia média de 1.29 e a face teia mais anisotrópica com uma anisotropia média de 1.35. Estas folhas de papel são dentro do conjunto dos papéis de referência as que possuem menor anisotropia. Embora os valores médios da orientação da distribuição de fibras se encontrem dentro da gama dos valores obtidos com os outros papéis, o grave problema que estas folhas de papel apresentam é o grande desalinhamento das fibras relativamente à *DM*, que se traduz em valores muito elevados para os desvios padrão referentes ao ângulo, os maiores observados entre os cinco tipos de papéis do *EFPG* estudados. Observando os mapas relativos às duas superfícies verifica-se que a face teia está ligeiramente mais alinhada com a *DM* do que a face feltro e que esse maior alinhamento se traduz por um desvio padrão inferior ao ocorrido para a face feltro. Folhas de papel com estas características apresentam normalmente problemas de instabilidade dimensional da folha para além de problemas de impressão (de notar que estes papéis foram produzidos para se estudar a influência da razão entre a velocidade de jacto e a velocidade teia na anisotropia e ângulo de orientação da distribuição das fibras no papel e não para serem comercializados).

Em conclusão, verifica-se que dos cinco papéis de referência estudados, o papel 363 18 é o que apresenta uma maior anisotropia média da distribuição de fibras para as duas superfícies (face feltro e face teia), sendo a face feltro mais anisotrópica que a face teia. Para este papel não se observam variações locais significativas na orientação da distribuição de fibras encontrando-se bem alinhadas com a direcção máquina. Este papel é o que apresenta o menor desvio padrão relativamente ao ângulo de orientação para ambas as faces.

Para os papéis 363 16 e 363 20 verifica-se uma inversão na relação entre as anisotropias da distribuição de fibras das duas superfícies. Para estes dois papéis as faces feltro são menos anisotrópicas que as face teia. Estes dois tipos de papel apresentam variações na orientação da distribuição das fibras relativamente à direcção máquina e o desalinhamento é bastante superior para o papel 363 20, que apresenta maior desvio padrão relativamente ao ângulo de orientação. Para o papel 363 20 o desalinhamento verifica-se em ambas as superfícies enquanto que para o papel 363 16 o desalinhamento (que é muito menor) só é observado para a face teia. O papel 363 20 é o papel que apresenta a menor anisotropia do conjunto dos cinco papéis de referência.

Os papéis 363 15 e 363 19 são papéis que tal como o papel 363 18 apresentam as face feltro mais anisotrópica que as face teia. Observou-se ainda que o papel 363 15 tem um bom alinhamento das fibras com a direcção máquina para ambas as superfícies. No entanto, para o papel 363 19 existe uma diferença significativa entre a orientação média da distribuição de fibras para a face feltro e para a face teia. Este papel em conjunto com o papel 363 20 podem apresentar problemas de instabilidade dimensional devido às diferenças de orientação que possuem.

Papéis laboratoriais quase isotrópicos de pinho e de eucalipto

As amostras das folhas de papel de pinho e eucalipto isotrópicas foram produzidas nos laboratórios do Departamento de Ciência e Tecnologia do Papel num formador isotrópico (MK).

Exemplos das distribuições de intensidade da difracção obtidas em dois pontos das superfícies com a montagem descrita estão apresentadas na figura 5-38(a) e (b) para as faces feltro das folhas de papel de pinho e eucalipto isotrópicos, respectivamente.

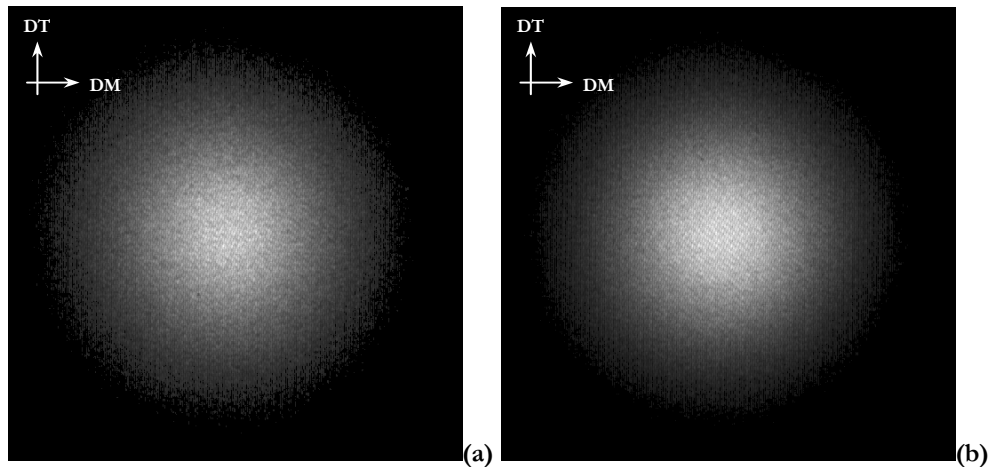


Figura 5- 38 Padrões de difracção gerados com a réplica das superfícies dos papéis laboratoriais de (a) pinho e (b) eucalipto para a face feltro.

Usando as imagens dos padrões de difracção apresentadas na figura anterior os resultados obtidos da aplicação do algoritmo descrito estão apresentados na figura 5-39(a) e (b) e na tabela 5-17. O contorno que melhor se adapta está sobreposto a cada uma das imagens dos padrões de difracção para efeitos de visualização.

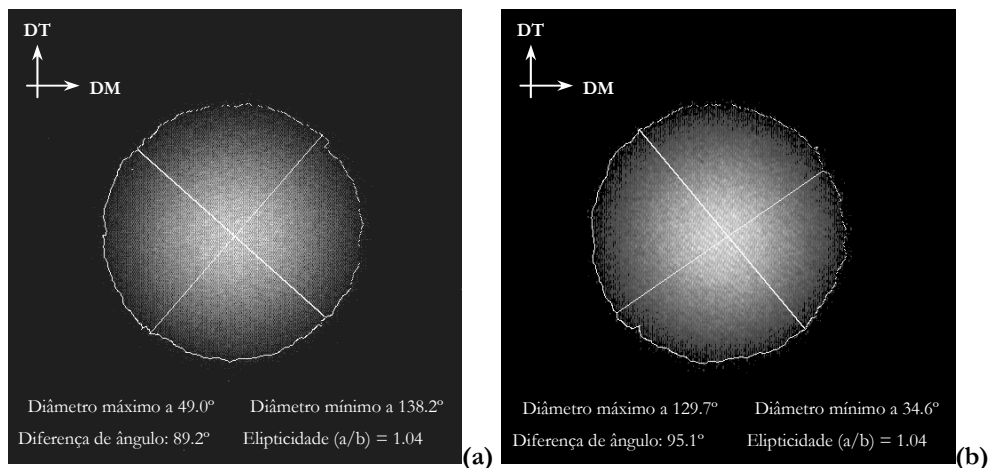


Figura 5- 39 Resultados da aplicação do algoritmo específico a dois padrões de difracção obtidos para os papéis laboratoriais de (a) pinho e (b) eucalipto para a face feltro.

Tabela 5- 17 Anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras dos padrões de difracção da figura 5-39 (papel de pinho e de eucalipto para a face feltro).

Face Feltro	Anisotropia	Ângulo (°)
Papel de pinho	1.04	49.00
Papel de eucalipto	1.04	-50.30

Como resultado das análises efectuadas às amostra de papel através de um varrimento sequencial xy foram criados mapas representativos das superfícies das folhas de papel os quais estão apresentados nas figuras 5-40(a) e (b) e 5-41(a) e (b) para as amostras de pinho e eucalipto, respectivamente. A área varrida foi de 132×132 mm². Os resultados globais obtidos para as amostras de papel de eucalipto e de pinho estão sintetizados na tabela 5-18.

Tabela 5- 18 Resultados globais da anisotropia média e ângulo de orientação médio da distribuição de fibras para o papel de pinho e de eucalipto, face feltro e face teia.

		Anisotropia média	Ângulo médio (°) (valor absoluto)
Papel de eucalipto	Face Feltro	1.08 ± 0.02	11.02 ± 36.80
	Face Teia	1.08 ± 0.02	23.10 ± 33.46
Papel de pinho	Face Feltro	1.09 ± 0.02	12.77 ± 33.08
	Face Teia	1.10 ± 0.02	20.26 ± 37.00

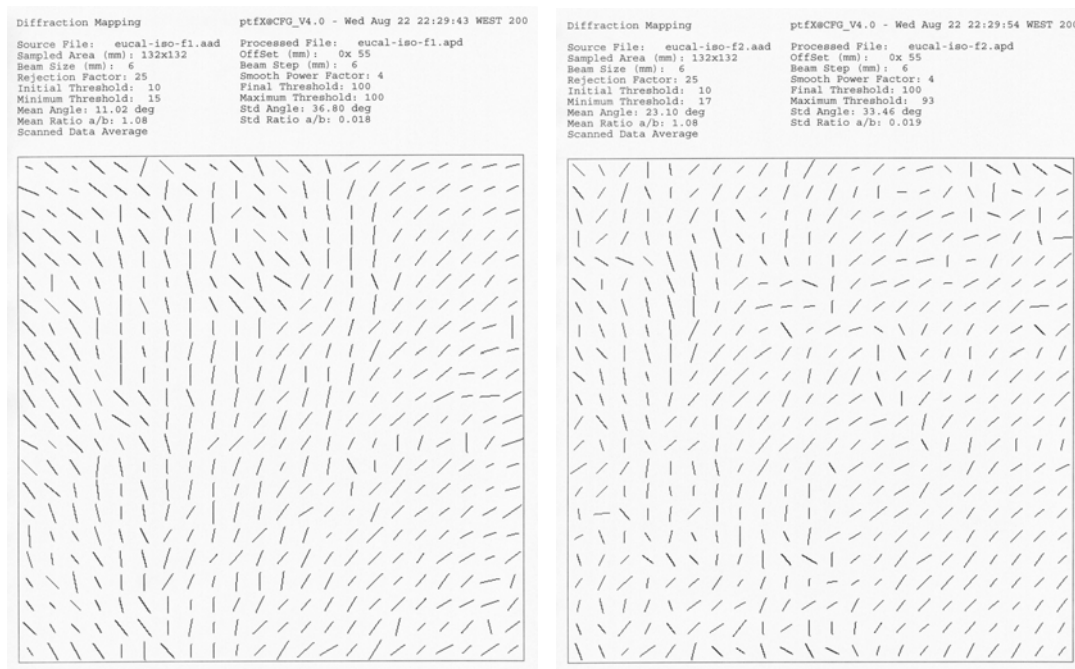


Figura 5- 40 Mapas das superfícies do papel laboratorial de eucalipto (a) face feltro e (b) face teia.

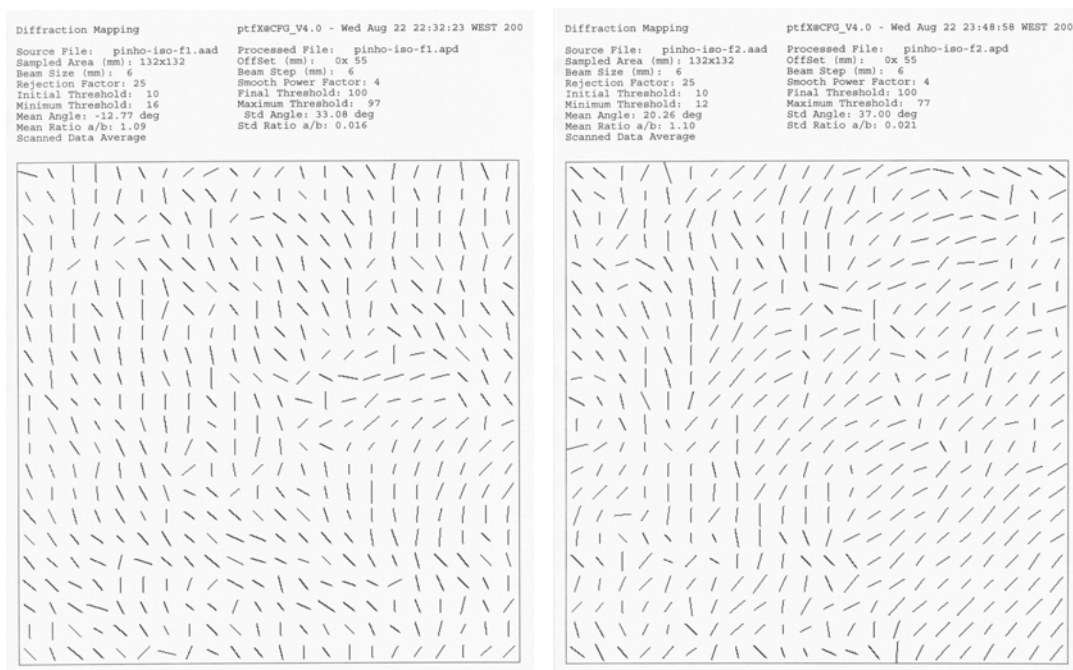


Figura 5- 41 Mapas das superfícies do papel laboratorial de pinho (a) face feltro e (b) face teia.

A partir dos resultados da figura 5-40(a) e (b) torna-se evidente que embora os papéis em estudo tenham sido produzidos num formador isotrópico com a finalidade de serem isotrópicos ($a/b = 1$) não o são apresentando no entanto anisotropias médias das distribuições de fibras baixas entre 1.08 e 1.10. Relativamente à orientação da distribuição de fibras verifica-se que não existe uma orientação preferencial para a distribuição das fibras nos dois papéis para ambas as faces. A grande desorientação observada nas superfícies deste tipo de folhas também se reflecte nos valores extremamente elevados dos desvios padrão, da ordem dos 30°.

De referir que para o caso de papéis isotrópicos ou quase isotrópicos (com anisotropias médias das distribuições de fibras muito próximas de 1), devido ao contorno que envolve o padrão de difracção ter a forma circular ou quase circular, o ângulo de orientação não é um parâmetro relevante a ter em consideração.

Papel de impressão e escrita de 80 gm⁻²

As amostras das folhas de papel de impressão e escrita de 80 gm⁻² são folhas de papel com as dimensões de formato A4 retiradas de uma resma de papel comum para impressão a laser ou a jacto de tinta e/ou para fotocópia.

Para as duas superfícies das folhas de papel de impressão, os resultados obtidos em dois pontos estão apresentados na figura 5-42(a) e (b) e na tabela 5-19. O contorno que melhor se adapta aos padrões de difracção é sobreposto às imagens para efeitos de visualização.

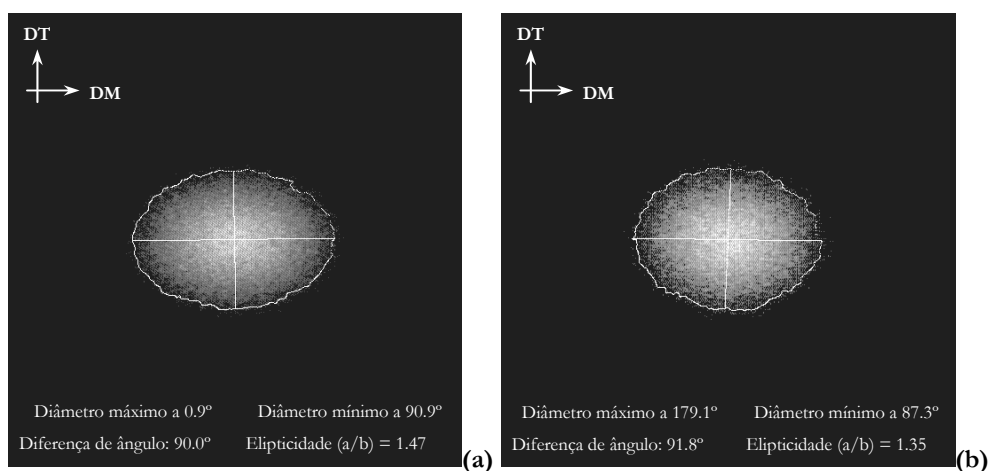


Figura 5- 42 Resultados da aplicação do algoritmo específico a dois padrões de difracção obtidos para o papel de impressão e escrita de 80 gm⁻² (a) face superior e (b) face inferior.

Tabela 5- 19 Anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras dos padrões de difracção da figura 5-42 (papel de impressão e escrita de 80 gm⁻² - face superior e face inferior).

Papel de impressão 80 gm ⁻²	Anisotropia	Ângulo (°)
Face Superior	1.47	0.90
Face Inferior	1.35	-0.90

Do varrimento sequencial *xy* efectuado à amostra, foram obtidos os mapas representativos das superfícies da folha de papel. Os resultados globais obtidos para a amostra de papel de impressão de 80 gm⁻² estão sintetizados na figura 5-43(a) e (b), onde se apresentam os mapas correspondentes aos varrimentos completos da réplica para as faces superior e inferior do papel sobre uma área de 192×192 mm². Os resultados globais obtidos para a amostra de papel de impressão de 80 gm⁻² estão sintetizados na tabela 5-20.

Tabela 5- 20 Resultados globais da anisotropia média e ângulo de orientação médio da distribuição de fibras para o papel de impressão e escrita de 80 gm⁻² - face superior e face inferior.

Papel de impressão 80 gm ⁻²	Anisotropia média	Ângulo médio (°) (valor absoluto)
Face Superior	1.45 ± 0.06	1.79 ± 2.39
Face Inferior	1.37 ± 0.05	0.09 ± 3.19

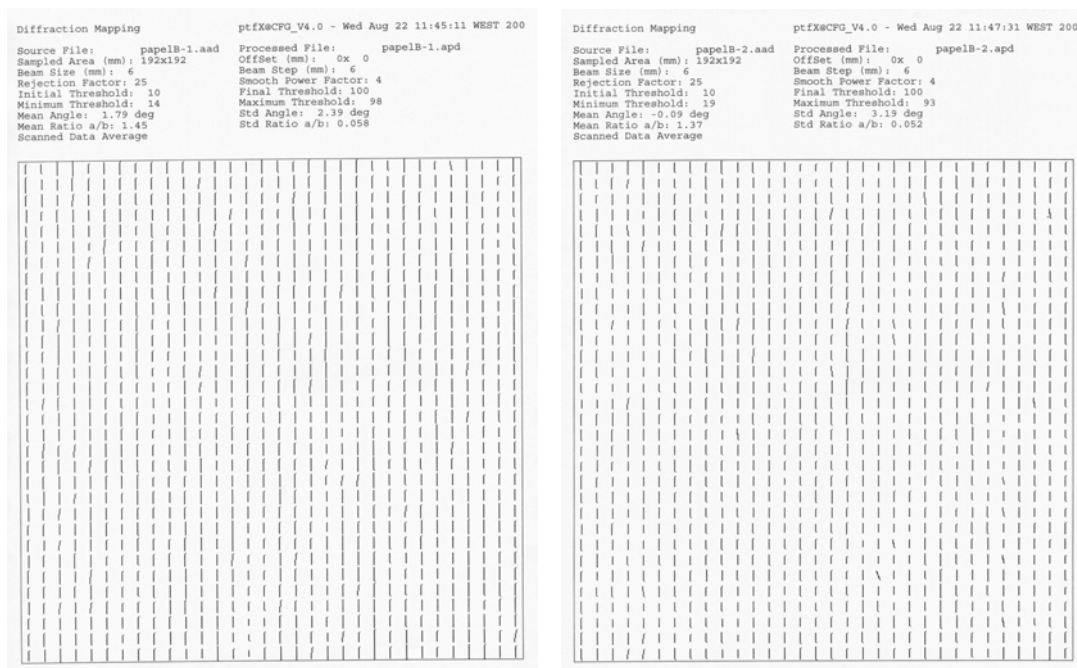


Figura 5- 43 Mapas das superfícies do papel de impressão e escrita 80 gm⁻² (a) face superior e (b) face inferior.

A partir dos resultados da figura 5-43(a) e (b) constata-se que existem diferenças de anisotropia média da distribuição de fibras entre as duas superfícies da folha de papel, sendo a face superior mais anisotrópica - 1.45, que a face inferior que apresenta uma anisotropia média de 1.37. Relativamente à orientação da distribuição de fibras constata-se que as fibras em ambas as faces se encontram bem alinhadas relativamente à direcção máquina (*DM*). Observando os mapas não se identificam grandes variações locais de orientação da distribuição de fibras tanto para a face superior como para a face inferior. Pode concluir-se, que este tipo de papel de impressão é um papel de boa qualidade uma vez que a diferença de anisotropia média da distribuição de fibras entre as duas faces não é muito elevada (não devendo portanto apresentar problemas de instabilidade dimensional) e que as fibras se encontram bem alinhadas com a direcção de fabrico do papel (*DM*) não apresentando desvios à orientação preferencial (não devendo portanto apresentar problemas de impressão).

Papel de impressão e escrita de 100 gm⁻²

As amostras das folhas de papel de impressão e escrita de 100 gm⁻² são folhas de papel com as dimensões de formato A4 retiradas de uma resma de papel comum para impressão a laser ou a jacto de tinta e/ou para fotocopiadora.

Para as duas superfícies das folhas de papel de impressão, os resultados obtidos em dois pontos estão apresentados na figura 5-44(a) e (b) e resumidos na tabela 5-21. O contorno que melhor se adapta aos padrões de difracção está sobreposto às imagens para uma melhor visualização.

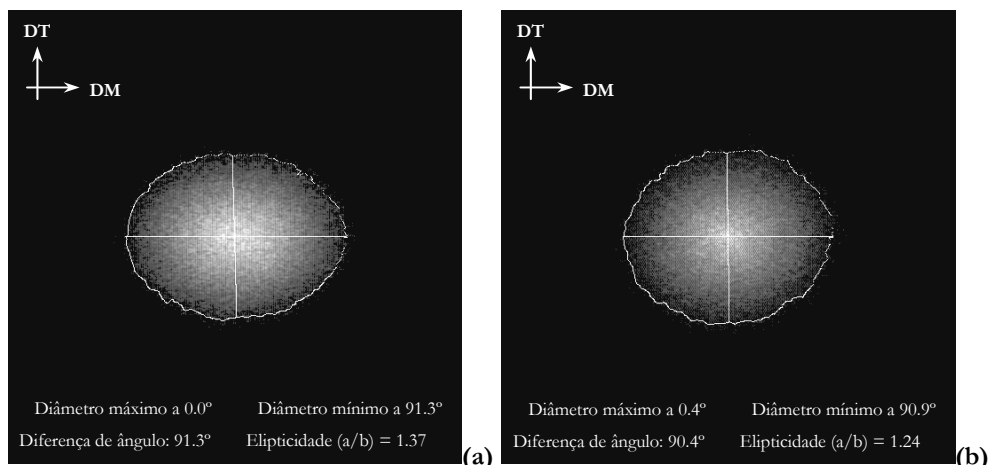


Figura 5- 44 Resultados da aplicação do algoritmo específico a dois padrões de difracção obtidos para o papel de impressão e escrita de 100 gm^{-2} (a) face superior e (b) face inferior.

Tabela 5- 21 Anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras dos padrões de difracção da figura 5-44 (papel de impressão e escrita de 100 gm^{-2} - face superior e face inferior).

Papel de impressão 100 gm^{-2}	Anisotropia	Ângulo (°)
Face Superior	1.37	0.00
Face Inferior	1.27	0.40

Como resultado da análise efectuada à amostra através de um varrimento sequencial xy foram criados dois mapas representativos das superfícies da folha de papel.

Os resultados globais obtidos para a amostra de papel de impressão e escrita de 100 gm^{-2} estão sintetizados na tabela 5-22 e na figura 5-45(a) e (b), onde se observam os mapas correspondentes aos varrimentos completos da réplica para as faces superior e inferior do papel sobre uma área de $192 \times 192 \text{ mm}^2$.

Tabela 5- 22 Resultados globais da anisotropia média e ângulo de orientação médio da distribuição de fibras para o papel de impressão e escrita de 100 gm^{-2} - face superior e face inferior.

Papel de impressão 100 gm^{-2}	Anisotropia média	Ângulo médio (°) (valor absoluto)
Face Superior	1.35 ± 0.06	2.45 ± 3.14
Face Inferior	1.27 ± 0.04	1.18 ± 3.87

A partir dos resultados da figura 5-45(a) e (b) pode concluir-se que as fibras em ambas as superfícies da folha de papel se encontram bem alinhadas relativamente à direcção máquina (DM), e que não se identificam variações locais na distribuição de orientação das fibras tanto para a face superior como para a face inferior.

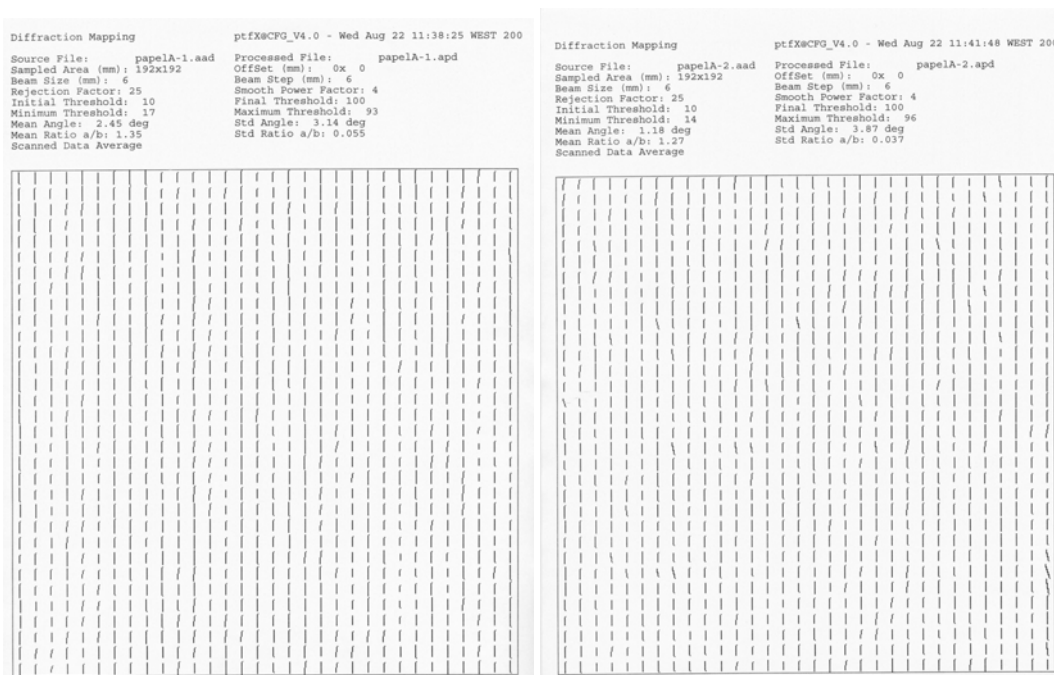


Figura 5- 45 Mapas das superfícies do papel de impressão e escrita de 100 gm⁻² (a) face feltro e (b) face teia.

Relativamente à anisotropia média da distribuição de fibras tornaram-se evidentes as diferenças de anisotropia entre as duas superfícies da folha de papel, sendo a face superior mais anisotrópica - 1.35, que a face inferior que apresenta uma anisotropia média de 1.27. Por observação dos dois mapas verifica-se ainda a existência, na face superior, de zonas onde as fibras apresentavam uma maior anisotropia. Assim, uma análise mais cuidada da superfície da folha de papel mostrou a existência de “marcas lineares” à superfície da face superior da folha não sendo notório o mesmo efeito na face inferior. O espaçamento entre essas “marcas lineares” não é constante, varia entre 20 e 26 mm, nem possuem a mesma espessura, a qual varia entre 6.0 e 9.0 cm.

Iniciou-se então um estudo baseado na determinação da anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras no interior e no exterior das “marcas”. Seleccionou-se a zona da réplica que melhor representava os defeitos. Nessa zona, efectuou-se um varrimento ao longo da superfície da réplica na direcção transversal à da produção da folha de papel. Realizaram-se oito medições correspondentes a quatro zonas sem “marcas” e a quatro zonas com “marcas”, como se pode ver na figura 5-46. Na figura 5-46 são bem visíveis quatro “marcas” na superfície do papel (níveis de cinzento diferentes) onde os traços a cheio foram colocados para melhor identificação das zonas com defeito.

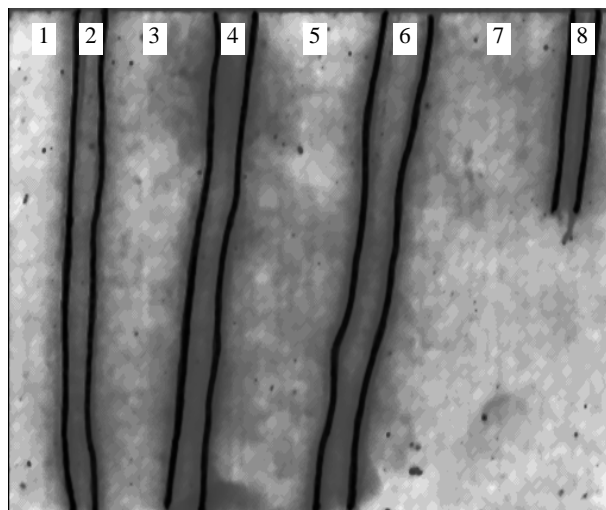


Figura 5- 46 Superfície superior da folha de papel de impressão e escrita de 100 gm⁻², apresentando marcas lineares ao longo do direcção de fabrico do papel.

As análises foram executadas alternadamente no exterior e no interior do defeito. Os padrões de difracção obtidos estão apresentados na figura 5-47.

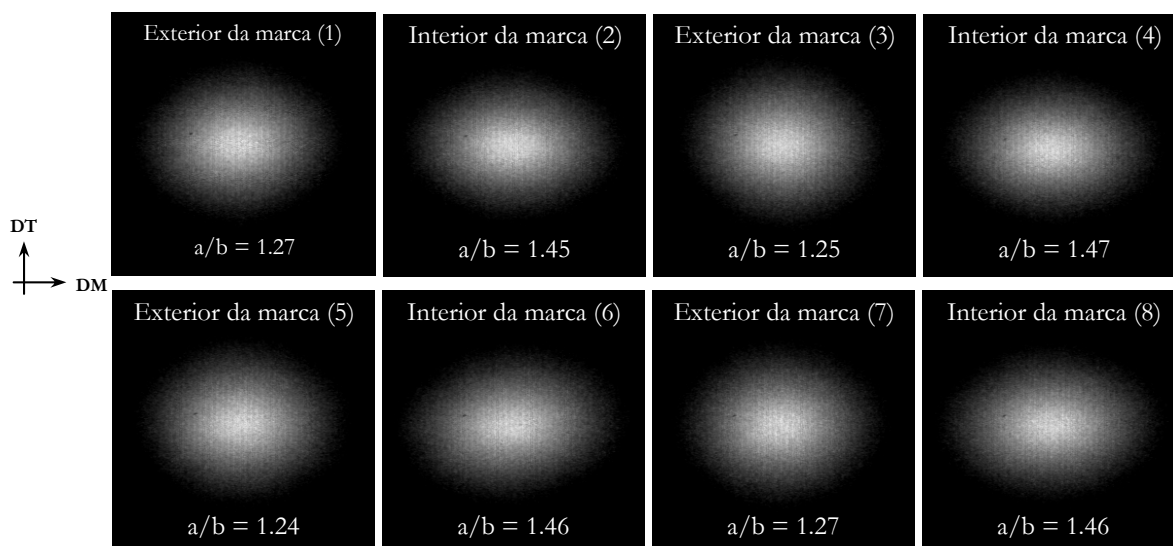


Figura 5- 47 Padrões de difracção obtidos na análise das marcas lineares existentes na superfície da face superior da folha de papel de impressão e escrita de 100 gm⁻².

Dos resultados obtidos pode constatar-se que as marcas apresentam uma anisotropia da distribuição de fibras maior, em média 1.46, logo um maior grau de orientação das fibras nessas zonas marcadas na folha de papel. Relativamente às zonas sem marcas o grau de orientação é inferior, em média 1.24. Esta variação é resultante da perturbação introduzida pelos jactos de pasta durante o processo de produção da folha de papel [19]. Para uma melhor visualização do problema do aparecimento das “marcas” numa das superfícies da folha de papel, apresentam-se na figura 5-48(a) e (b) os gráficos a 3D correspondente às faces superior e inferior da folha de papel.

Conforme se pode observar da figura 5-48, na face superior são bem visíveis “marcas lineares” enquanto que para a face inferior esse fenómeno não ocorre. Para além do problema das marcas, este

tipo de papel de impressão é um papel de boa qualidade não se verificando problemas nem de instabilidade dimensional nem de impressão.

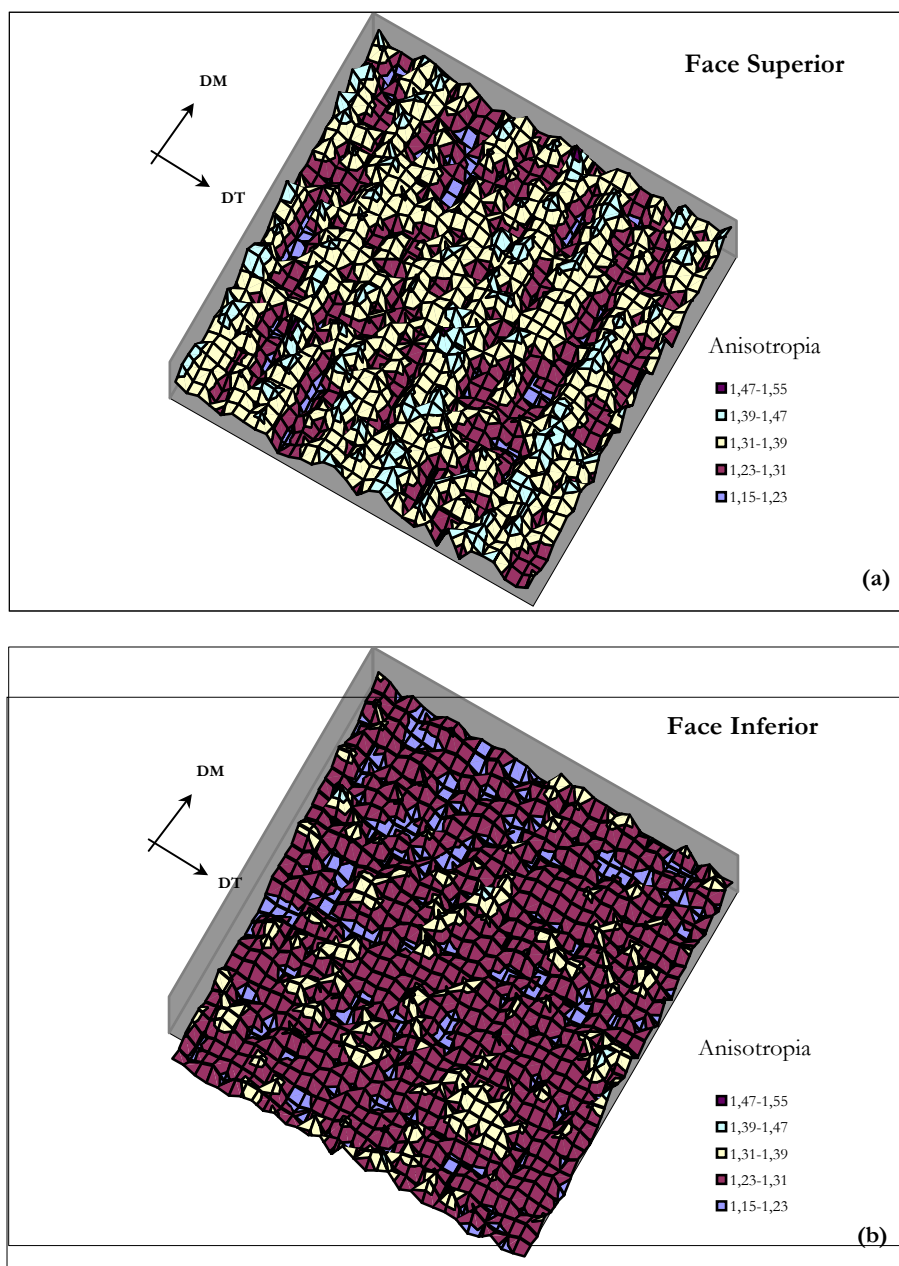


Figura 5- 48 Representação tridimensional da parte da superfície (a) superior e (b) inferior analisada da folha de papel de impressão e escrita de 100 gm^{-2} .

Papel industrial kraft liner, duas caixas de formação

As amostras de papel em questão foram produzidas numa máquina de papel industrial com duas caixas de chegada, em que a face inferior da folha de papel corresponde à caixa de cobertura, com uma composição baseada em papel reciclado misturado com fibra virgem, possuindo uma gramagem de aproximadamente 41 gm^{-2} (33% do total) e a face superior dessa mesma folha é constituída por 100% de fibra virgem com uma gramagem de aproximadamente 84 gm^{-2} .

Em dois pontos das superfícies das folhas de papel kraft liner, face superior e inferior respectivamente, os resultados obtidos (resumidos na tabela 5-23) são apresentados na figura 5-49(a) e (b) com o contorno que melhor se adapta sobreposto a cada uma das imagens dos padrões de difracção para fins de amostragem.

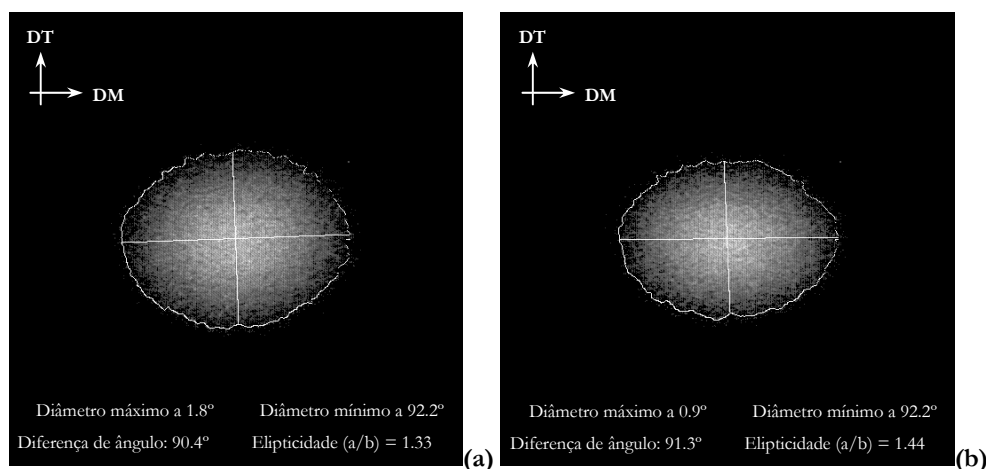


Figura 5- 49 Resultados da aplicação do algoritmo específico a dois padrões de difracção obtidos para o papel industrial kraft liner (a) face superior e (b) face inferior.

Tabela 5- 23 Anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras dos padrões de difracção da figura 5-49 (papel industrial Kraft liner - face superior e face inferior).

Papel Kraft liner	Anisotropia	Ângulo (°)
Face Superior	1.33	1.80
Face Inferior	1.44	0.90

Em resultado da análise efectuada à amostra de papel através de um varrimento sequencial xy os dois mapas representativos das superfícies da folha de papel são apresentados nas figuras 5-50(a) e (b). A área varrida foi de $120 \times 120 \text{ mm}^2$ para a face superior e de $108 \times 108 \text{ mm}^2$ para a face inferior. Os resultados globais obtidos para a amostra de papel industrial kraft liner estão sintetizados na tabela 5-24.

Tabela 5- 24 Resultados globais da anisotropia média e ângulo de orientação médio da distribuição de fibras para o papel industrial Kraft liner - face superior e face inferior.

Papel Kraft liner	Anisotropia média	Ângulo médio (°) (valor absoluto)
Face Superior	1.34 ± 0.04	2.15 ± 3.00
Face Superior	1.44 ± 0.07	0.82 ± 2.27

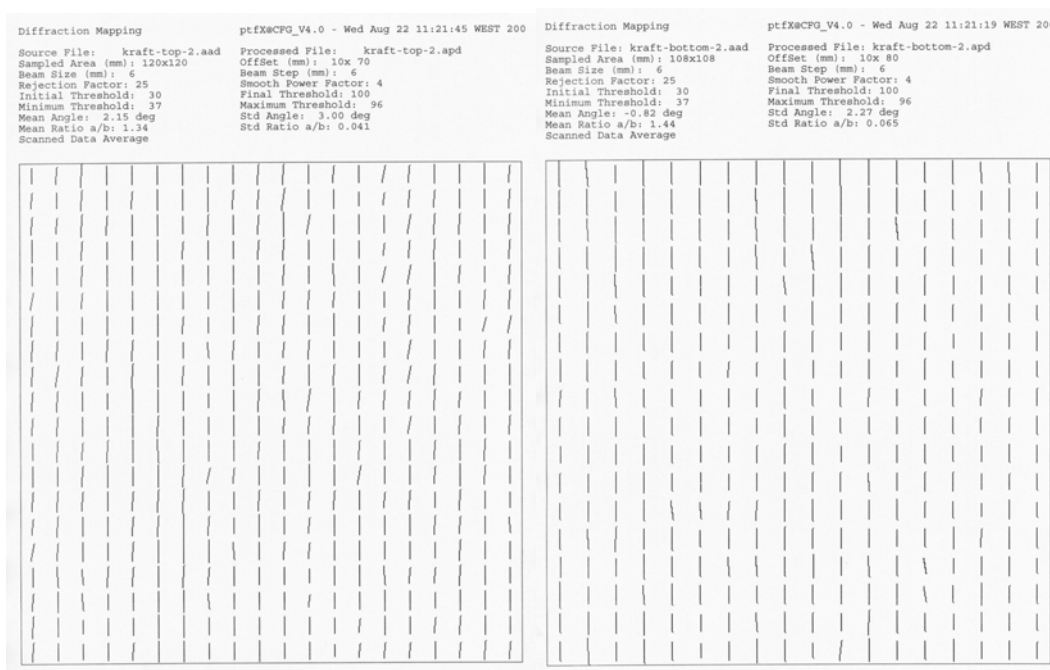


Figura 5- 50 Mapas das superfícies do papel industrial kraft liner (a) face superior e (b) face inferior.

Da análise da figura anterior pode concluir-se que a face superior da folha de papel kraft liner (figura 5-50(a)) correspondente à 2ª caixa de chegada de pasta, tem uma anisotropia média da distribuição de fibras de 1.34 e que para a face inferior, que corresponde à primeira caixa de chegada, tem uma anisotropia média da distribuição de fibras superior de 1.44. Relativamente à orientação da distribuição de fibras constata-se que as fibras em ambas as superfícies se encontram bem alinhadas relativamente à direcção máquina (*DM*) não se registando variações.

Papéis comerciais para impressão e/ou fotocopiadora

Um conjunto de cinco amostras (dimensão de formato A4) de papéis comerciais diferentes com anisotropias de distribuição de orientação de fibras muito semelhantes, foram analisados com o método óptico de análise implementado. Para isso foram produzidas réplicas de 200×200 mm² de ambas as superfícies das amostras de papel. O varrimento efectuado sobre a área predefinida foi um varrimento contínuo e sequencial com um diâmetro do feixe laser de 6 mm e um passo para o varrimento de 6 mm. Para cada réplica foram realizados quatro varrimentos.

Dos resultados globais obtidos dos mapas correspondentes aos varrimentos completos das réplicas, para as faces superior e inferior, das cinco amostras de papel comercial estudadas, construiu-se a tabela 5-25, onde são apresentados os resultados da anisotropia e do ângulo de orientação da distribuição de fibras bem como os respectivos desvios padrão.

Tabela 5- 25 Resultados da análise de difracção para amostras de papel comercial - face superior e face inferior.

Amostra	Método da Difracção Laser			
	Face Superior		Face Inferior	
	anisotropia	ângulo (°)	Anisotropia	Ângulo (°)
P1	1.34 ± 0.04	3.69 ± 4.23	1.32 ± 0.03	1.86 ± 2.91
P2	1.35 ± 0.04	0.58 ± 2.68	1.35 ± 0.04	1.14 ± 2.60
P3	1.35 ± 0.05	0.67 ± 2.19	1.33 ± 0.04	0.23 ± 2.48
P4	1.33 ± 0.05	0.42 ± 2.08	1.34 ± 0.05	0.93 ± 2.46
P5	1.40 ± 0.06	0.13 ± 1.60	1.36 ± 0.04	0.29 ± 2.45

Da tabela 5-25 verifica-se que não existem variações significativas nos valores da anisotropia para os diferentes tipos de papel, e que existe uma grande uniformidade nos valores obtidos para a anisotropia entre as duas faces de todos os papéis. Verifica-se também que no caso dos papéis P2 a P5 existe um bom alinhamento das fibras com a direcção máquina para ambas as faces desses papéis, e que no caso do papel P1 existe um desalinhamento para a face superior, embora não seja muito significativo.

5.5 O método da difracção laser em comparação com outros métodos papeleiros

Com a finalidade de se estabelecerem correlações entre os resultados obtidos com o método da difracção laser e os resultados obtidos com outros métodos estabelecidos na indústria papeleira utilizaram-se os papéis de referência 363 15, 363 16, 363 18, 363 19 e 363 20 produzidos numa máquina piloto na Escola Francesa de Papelaria do Instituto Nacional Politécnico de Grenoble, visto terem sido as amostras de referência utilizadas nos vários métodos implementados em laboratórios espalhados por todo mundo e dos quais existem resultados publicados em revistas científicas da especialidade (embora para amostras diferentes do mesmo conjunto de papéis) [4,7].

Na tabela 5-25, encontram-se sintetizados os resultados obtidos para os diferentes métodos para os papéis de referência encontrados na literatura bem como os resultados experimentais obtidos com o método da difracção laser.

Tabela 5- 26 Resultados da anisotropia para as amostras de papel 363 15, 363 16, 363 18, 363 19 e 363 20, obtidos pelos diferentes métodos.

PAPEL ref.	MÉTODOS						
	Colorimétrico (volume)	LIPPKE (volume)	Análise Imagem Feltro Teia		Difracção Laser Feltro Teia		TSI (volume)
15	1.71	1.82	1.69	1.66	1.66	1.57	3.69
16	1.41	1.47	1.50	1.62	1.41	1.53	2.39
18	1.97	2.14	1.80	1.76	1.74	1.70	4.53
19	1.42	1.60	1.59	1.56	1.60	1.54	2.81
20	1.13	1.23	1.30	1.33	1.29	1.35	1.72

Para as faces feltro e teia das folhas de papel analisadas estabeleceu-se a comparação entre os valores da anisotropia média da distribuição de fibras obtidos por análise de difracção e por análise de imagem. Os resultados da comparação podem ser observados na figura 5-51. Dos gráficos da figura 5-51 pode concluir-se que existem bons factores de correlação (superiores a 95%) para ambas as superfícies entre os métodos de análise de difracção e análise de imagem.

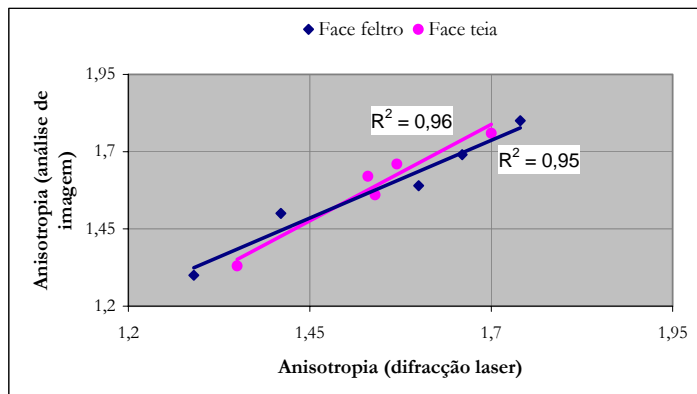


Figura 5- 51 Correlações entre os métodos de análise por difracção laser e por análise de imagem.

Como os resultados obtidos pelos outros métodos correspondem a análises realizadas na espessura da folha de papel (método colorimétrico, método da transmissão da luz através da amostra (LIPPKE) e o método ultrasónico (TSI), já descritos no capítulo 1 desta tese) calculou-se para a análise por difracção o valor médio da anisotropia da distribuição de fibras para as diversas amostras com base nas anisotropias correspondentes a cada uma das faces. Os resultados da comparação entre os quatro métodos podem ser observados na figura 5-52.

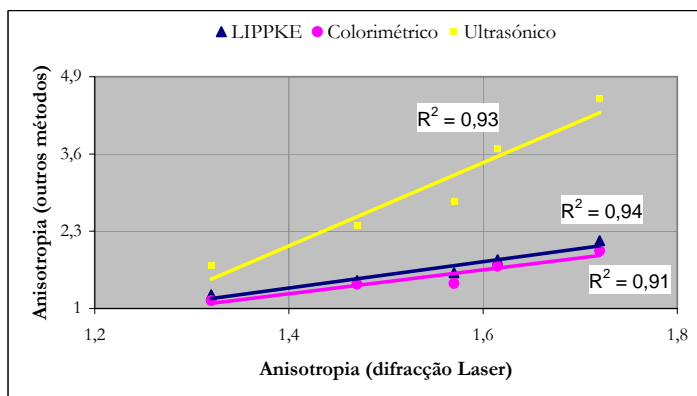


Figura 5- 52 Correlações entre o método de análise por difracção laser e os métodos colorimétrico, LIPKKE e ultra-sónico.

Para estes métodos, tendo em atenção que as amostras embora sendo do mesmo conjunto não são as mesmas e que só se comparam valores médios, os factores de correlação obtidos são bons (superiores a 90%). De notar que a dispersão dos resultados para o método ultra-sónico é mais elevada de que com os outros métodos. O método ultra-sónico apresenta sempre valores bem mais elevados uma vez que os resultados deste método não correspondem unicamente à anisotropia da distribuição de fibras na folha de papel mas também às tensões internas e elongações existentes nas fibras resultante dos processos de prensagem e secagem da folha de papel durante o seu processo de fabrico [21-23].

No seguimento deste estudo de comparação entre o método da difracção laser e outros métodos estabelecidos na indústria papelreira, efectuou-se um outro estudo comparativo entre o método da difracção laser e o método ultra-sónico para se averiguar qual a resposta deste último método, no caso de papéis com anisotropia semelhante. Para isso, o conjunto de cinco amostras de papéis de impressão comuns com anisotropia semelhante, apresentados na secção 5.4 (papéis comerciais para impressão e/ou fotocopiadora), foram analisados também pelo método ultra-sónico por forma a estabelecer uma comparação entre os dois métodos. Na tabela 5-27 apresentam-se os resultados da anisotropia e do ângulo de orientação, para o mesmo conjunto de amostras de papel, obtidos com o método ultra-sónico.

Tabela 5- 27 Resultados do método ultra-sónico para amostras de papel comerciais.

Amostra Id.	Método Ultra-sónico	
	Razão TSI MD/CD	ângulo TSO (°)
P1	2.25 ± 0.03	7.07 ± 1.09
P2	2.48 ± 0.03	2.86 ± 0.67
P3	2.29 ± 0.04	1.04 ± 0.73
P4	2.25 ± 0.03	0.68 ± 0.57
P5	2.37 ± 0.01	1.78 ± 0.60

Com os resultados das tabelas 5-25 e 5-27 efectuou-se um estudo da correlação entre os dois métodos em questão. Tal como referido anteriormente, tendo em atenção que os resultados obtidos pelo método ultra-sónico correspondem a uma análise sobre a espessura da folha de papel e que os resultados obtidos pelo método da difracção laser correspondem a uma análise nas superfícies dessas folhas de papel, para se poder estabelecer uma comparação entre os dois métodos foi calculado o valor médio das anisotropias medidas para ambas as faces das amostras, por forma a representar a anisotropia global das amostras de papel (ver tabela 5-28).

Tabela 5- 28 Compilação de resultados das medições da anisotropia e ângulo de orientação para os métodos ultra-sónico e de difracção.

Amostra Id.	Método da Difracção (valores médios)		Método Ultra-sónico (na espessura da amostra)	
	Anisotropia	Ângulo orient. (°)	TSI MD/CD	Ângulo TSO (°)
P1	1.33 ± 0.03	2.77 ± 2.57	2.25 ± 0.03	7.07 ± 1.09
P2	1.35 ± 0.03	0.86 ± 1.87	2.48 ± 0.03	2.86 ± 0.67
P3	1.34 ± 0.03	0.45 ± 1.65	2.29 ± 0.04	0.96 ± 0.83
P4	1.33 ± 0.03	0.67 ± 1.61	2.25 ± 0.03	0.40 ± 0.78
P5	1.38 ± 0.04	0.21 ± 1.46	2.37 ± 0.01	1.78 ± 0.60

A figura 5-53(a) apresenta a correlação entre a razão dos índices TSI ("*Tensile Stiffness Index*") para a direcção máquina e transversal e a anisotropia média da difracção, enquanto que a figura 5-53(b)

apresenta a correlação entre o ângulo TSO e o ângulo de orientação da difracção ambos relativos à direcção máquina.

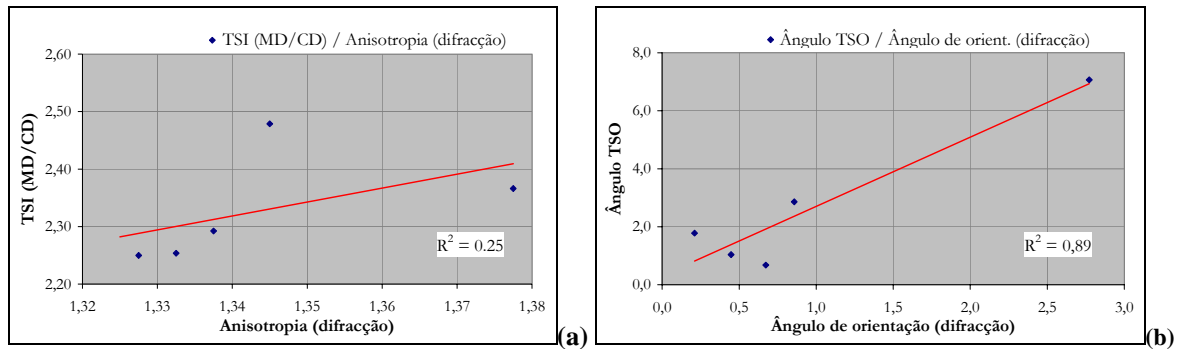


Figura 5- 53 Correlação entre (a) medições de anisotropia equivalentes e (b) medições de ângulos equivalentes.

Conforme se pode observar da figura 5-53 não existe uma boa correlação entre os resultados obtidos pelos dois métodos. A comparação entre os resultados para a anisotropia obtidos pelo método da difracção laser e pelo método ultra-sónico apresenta um baixo factor de correlação (0.30). No entanto, a comparação entre os resultados dos ângulos de orientação obtidos pelo método da difracção laser e pelo método ultra-sónico apresenta um factor de correlação mais elevado (0.89). Isto é devido ao facto de as tensões e elongações internas existentes nas folhas de papel comerciais afectarem principalmente a anisotropia da distribuição das fibras e não a sua orientação [21-23].

As medições ultra-sónicas são fortemente influenciadas pelas tensões e elongações nas fibras que ocorrem na estrutura do papel (em grande parte devido ao processo de fabrico), apresentando sempre valores para a anisotropia acima da média, uma vez que o método ultra-sónico não mede unicamente a orientação e a anisotropia das fibras [21-23]. Para folhas de papel que possuam valores para a anisotropia muito semelhantes, o método ultra-sónico não tem resolução suficiente para produzir resultados satisfatórios. No entanto se as folhas de papel apresentarem variações significativas de anisotropia, os resultados obtidos com o método ultra-sónico quando comparados com outros métodos apresentam melhores factores de correlação (ver figura 5-52), apesar da elevada dispersão nos resultados [7-9].

5.6 Análise da estrutura interna de folhas de papel

Para a análise da estrutura interna de folhas de papel utilizou-se um processo de clivagem que consiste essencialmente na plastificação das duas superfícies da folha de papel seguido de uma clivagem por separação da folha em duas partes, obtendo-se deste modo duas superfícies internas da folha. Neste processo, optou-se por denominar as superfícies internas com o mesmo nome das respectivas superfícies externas acrescido de ', isto é, A e A' conforme se apresenta na figura 5-54.

Após a clivagem das folhas de papel mediu-se a espessura de cada uma das partes da folha (segundo a norma TAPPI 411 om-89). De seguida produziram-se réplicas das duas superfícies internas e efectuou-se a análise da distribuição da orientação das fibras quantificando os valores médios para a anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras para cada uma delas.

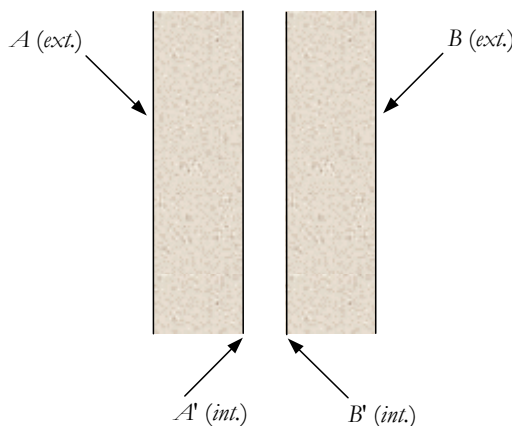


Figura 5- 54 Esquema da obtenção das superfícies internas de uma folha de papel. *A* e *B* representam as superfícies externas da folha, enquanto que *A'* e *B'* representam as superfícies internas da folha.

Foram realizados estudos em folhas de papel de impressão comuns e em papel kraft liner, para as duas superfícies externas e para as duas superfícies internas obtidas por clivagem. Os resultados obtidos para a espessura de cada uma das partes das folhas encontram-se nas tabelas 5-37 e 5-38 do apêndice 3.

Na tabela 5-29, apresentam-se os valores experimentais obtidos para a anisotropia média, ângulo de orientação médio e respectivos desvios padrões, para as faces externas e internas das folhas analisadas.

Tabela 5- 29 Valores da anisotropia e do ângulo de orientação para as superfícies internas e externas dos papéis de impressão e kraft após clivagem.

Face	Papel de impressão		Papel kraft liner	
	Anisotropia	Ângulo (°)	Anisotropia	Ângulo (°)
<i>A</i>	1.28 ± 0.04	2.1 ± 3.60	1.32 ± 0.05	2.1 ± 4.90
<i>A'</i>	1.26 ± 0.05	2.2 ± 3.00	1.36 ± 0.05	2.3 ± 4.90
<i>B'</i>	1.26 ± 0.04	2.6 ± 4.90	1.31 ± 0.05	0.5 ± 4.30
<i>B</i>	1.32 ± 0.05	2.1 ± 4.90	1.30 ± 0.05	1.5 ± 4.80

Da tabela 5-29, e das tabelas 5-37 e 5-38 do apêndice 3, pode concluir-se que para a folha de impressão se obtiveram, através do processo de clivagem, duas partes praticamente com a mesma espessura. A clivagem foi então obtida na parte média da espessura da folha (50:50) o que era de esperar em virtude do processo de fabrico utilizado para produção do papel de impressão (uma caixa de formação). Verificou-se ainda que a soma das espessuras das duas partes clivadas é igual à espessura total da folha original, o que indica que o método não alterou a estrutura da folha. Relativamente à anisotropia da distribuição de fibras, apresentada na figura 5-55(a), ela é diferente para as duas faces externas (*A* e *B*) diminuindo na sua parte intermédia da folha, onde existe um nivelamento, devido à homogeneização

do substrato de fibras no interior da folha de papel. Quanto ao ângulo de orientação das fibras, este não apresenta variações significativas entre a superfície e o interior da folha de papel.

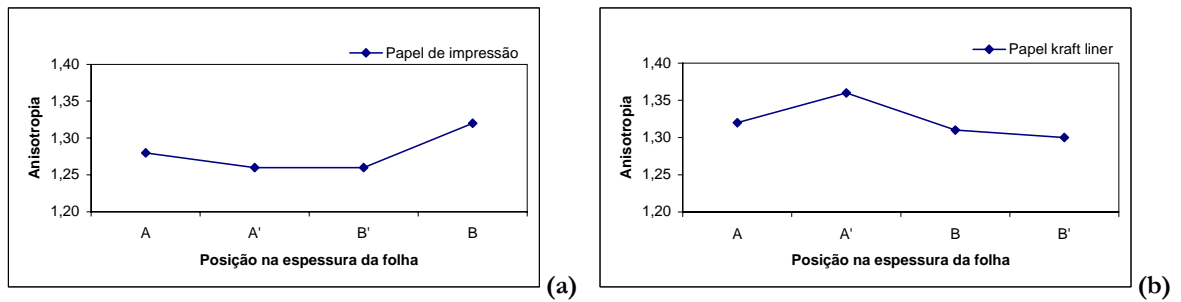


Figura 5- 55 Variação da anisotropia ao longo da espessura de uma folha de papel (a) papel de impressão e (b) papel kraft liner industrial.

No caso do papel kraft liner, pode concluir-se que através da clivagem se obtiveram duas partes com espessuras diferentes, na razão 2:1. Este facto, também já esperado, é devido ao facto de a máquina de formação deste papel possuir duas caixas de formação que distribuem diferentes quantidades de pasta na teia de formação da folha de papel. Verificou-se ainda que para este tipo de papel a soma das espessuras das duas partes clivadas é superior em 17% à espessura da folha original, porque no papel kraft liner as fibras estão altamente comprimidas (as folhas apresentavam curvatura) e ficaram distendidas depois da clivagem. De referir que a anisotropia da distribuição de fibras (ver figura 5-55(b)) é semelhante para as faces externas deste papel existindo uma diferença significativa na anisotropia para as faces internas do papel, o que explica a grande curvatura das folhas de papel. Relativamente ao ângulo de orientação das fibras, como a folha de papel kraft liner é o resultado de duas folhas de papel produzidas em separado, observam-se variações consideráveis no ângulo de orientação na zona de interface entre essas duas folhas, onde que para cada uma das folhas a variação do ângulo de orientação das fibras não é significativa. Este resultado é, como já foi referido, devido ao processo de produção da folha.

Com este método de clivagem, que é um método relativamente simples de se realizar, é possível efectuar-se a análise da folha de papel através da sua espessura. É um método que permite a diferenciação da orientação das fibras tanto nas faces externas como nas faces internas das folhas de papel. As conclusões retiradas deste estudo estão de acordo com o processo de formação do papel, que depende da configuração das caixas de formação.

5.7 Resumo

Este capítulo foi inteiramente dedicado à descrição da parte experimental desta tese. Em primeiro lugar descreveu-se a metodologia implementada para o método de análise proposto desde a produção de réplicas, à obtenção de padrões de difracção das réplicas, à aquisição e processamento desses mesmos padrões de difracção e à quantificação da anisotropia e ângulo de orientação da distribuição de fibras à superfície das folhas de papel. Depois procedeu-se à descrição completa do método de produção de

réplicas transparentes das superfícies das folhas de papel e às técnicas utilizadas no seu controlo de qualidade tendo-se efectuado para o efeito várias análises à superfície das réplicas medindo-se a sua lisura e rugosidade quer por observação directa através de métodos ópticos nomeadamente por microscopia electrónica e metalográfica.

Descreveu-se também detalhadamente o sistema óptico experimental especificando todos os componentes que a constituem e em particular o sistema automático de varrimento horizontal/vertical, tendo-se depois procedido ao estudo dos vários parâmetros fundamentais para a realização dessa aquisição automática.

Finalizou-se este capítulo com a apresentação dos resultados experimentais constituídos pela caracterização completa de vários conjuntos de papéis produzidos em laboratório bem como de papéis de impressão industriais largamente comercializados, tendo sido apresentadas algumas aplicações do método ao estudo de parâmetros de extra importância para a produção de papel de boa qualidade.

Referências

- [1] Rudström L., Sjölin U., “A method for determining fibre orientation in paper by using laser light”, *Svenske Papperstidning*, 73, **5**, 117-121 (1970).
- [2] Mark, R.E., “Structure and structural anisotropy”, Edited by Maek R.E., in “*Handbook of Physical and Mechanical Resting of Paper and Paperboard*”, New York: Mercel Dekker, Vol. 2, 283-377 (1984).
- [3] Schaffnit, C., Silvy, J., Dodson, C.T.J., “Orientation density distributions of fibres in paper”, *Nordic Pulp and Paper Research Journal* **3**, 121-128 (1992).
- [4] Drouin, B., Gagnon, R., Schroder, A., Butel, M., Silvy, J., “L’orientation des fibres et les propriétés mécaniques du papier: méthodes de contrôle de l’anisotropie de la feuille”, *Revue A.T.I.P.* **49**, 2, 66-72 (1995).
- [5] Drouin, B., Gagnon, R., “Optical measurement of paper fiber orientation”, *Optical Engineering* **32**, 9, 2138-2142 (1993).
- [6] Silvy, J., “Étude Structurale de Milieux Fibreux”, These de Doctorat d’Etat Institut National Polytechnique et Université Scientifique et Medicale. Grenoble, (1980).
- [7] Fiadeiro, P.T., Pereira, M.J., Jesus, M.E.P., Silvy, J., “The surface measurement of fiber orientation anisotropy and misalignment angle by laser diffraction” in press *Journal of Pulp and Paper Science* (2002).
- [8] Pereira, M.J., Fiadeiro, P.T., “Distribuição da orientação de fibras no papel: um estudo comparativo”, *Proceedings of Engenbaria 2001 - Inovação e Desenvolvimento*, 111-116 (2001).
- [9] Pereira, M.J., Fiadeiro, P.T., Silvy J., “Paper surface diffraction to characterise the fibre orientation distribution”, *Proceedings of Conference 4448-24, SPIE's 46th Annual Meeting - International Symposium on Optical Science and Technology*, (2001).
- [10] Pereira, M.J., Costa, A.P., Salvado, R., Silvy, J., Fiadeiro, P.T., “Structure of papers and Nonwovens”, *Proceedings of Materiais 99*, 2/393-2/398 (1999).
- [11] Pereira, M.J., Costa, A.P., Belgacem, N., Fiadeiro, P.T., Silvy, J., “Surface Characterization of Paper by Optical Diffraction and Interferometry”, *Proceedings of Paper Physics - A Seminar*, **F5** (1998).

- [12] Pinto, A., Costa, A.P., Silvy, J., “A rugosidade do papel”, *Proceedings of 16^o Encontro da Tecnicalpa*, 416-418 (1998).
- [13] Meyer-Arendt, Jurgen R. “Introduction to Classical and Modern Optics”, 4th ed., Pub. Prentice-Hall, Inc., New Jersey (1995).
- [14] Pedrotti F. L.; Pedrotti L. S. “Introduction to Optics” ”, 2th ed., Pub. Prentice-Hall, Inc., New Jersey (1993).
- [15] Hecht, E., “Optics”, 3th ed., Pub. Addison Wesley Longman, Inc., New York (1998).
- [16] Jenkins, F. A., White, H. E., “Fundamentals of Optics”, 4th ed., Pub., Mcgraw-Hill Book Company, Inc., Singapore (1976).
- [17] Guenther, R. D., “Modern Optics”, Pub. John Wiley & Sons, Inc., New York (1990).
- [18] Giancoli, D. C., “Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics”, 2nd ed., Pub. Prentice-Hall, Inc., New Jersey (1988).
- [19] Silvy, J., Lebreton, P., Butel, M., “Influence de la difference des vitesses du jet de pate et de la taille de la machine sur les caracteristiques physiques du papier”, *Doc. FCI École Francaise de Papeterie de Grenoble*, IRFIP SE, 92, 46 (1976).
- [20] Soderberg L.D., Alfredsson P.H., “Experiments concerning the origin of streaky structures inside a plane water jet”, *Journal of Pulp and Paper Science*, **11**, 26, , 395-400 (2000).
- [21] Lindblad, G., “Ultrasonic measurement – a reliable method for the quality control of paper”, *Hanbbook da Lorentzen&Wettre*, 14-26 (1996).
- [22] Hess T.R., Brodeur P.M., “Effects of wet straining and drying on fibre orientation and elastic stiffness orientation”, *Journal of Pulp and Paper Science* **2**, 22, J160-J164 (1996).
- [23] Waterhouse, J.F., “The Ultrasonic Testing of Paper and Board - Principles and Applications”, *TAPPI Journal* **1**, 77 (1994).
- [24] Costa, A.P., Pereira, M.J., Trindade, A.C., Fiadeiro, P.T., Silvy, J., Serra Tosio, K.M., “New method for the measurement of the fibres orientation on the paper faces applied to the analysis of hygroinstability in paper sheets”, *Proceedings of 4th International Symposium Moisture and Creep Effects on Paper Board and Containers*, 174-189 (1999).

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

6.1 Conclusões

O trabalho desenvolvido nesta tese suportado pelos resultados experimentais obtidos para as diversas amostras de papéis, provenientes quer da indústria papelreira quer produzidas laboratorialmente, estudadas ao longo desta tese, provam que é possível caracterizar-se uma folha de papel com base no reconhecimento dos padrões de difracção produzidos por réplicas transparentes (negativas) das superfícies dessa mesma folha de papel.

O conhecimento da distribuição da orientação das fibras numa folha de papel é fundamental para a compreensão da estrutura e das propriedades dessa folha. A representação da estrutura de um meio fibroso, como o de uma folha de papel, pode ser feita com base na distribuição espacial da curvatura das fibras segundo o conceito do modelo do poro equivalente. De acordo com este modelo obtém-se uma representação geométrica e sintética da estrutura da folha de papel, através da decomposição das fibras de celulose em pequenos segmentos rectilíneos, os quais depois de colocados topo a topo uns a seguir aos outros, produzem uma figura representativa do poro médio equivalente da rede de fibras da superfície dessa folha de papel. Para os papéis industriais a figura do poro médio equivalente é uma figura elíptica, isto é, um anel elíptico. Por forma a provar-se que os resultados obtidos para a anisotropia e ângulo de orientação das fibras pelo método da difracção laser representam efectivamente a distribuição das fibras no papel, isto é, que estão de acordo com o modelo do poro equivalente, simulou-se o poro médio equivalente através de um anel elíptico com a introdução de um factor de fase. Os resultados obtidos, apresentados na secção 4.3.3.4 do capítulo 4, estão em total acordo com os resultados obtidos pelo método desenvolvido nesta tese.

O sistema óptico utilizado na caracterização das superfícies das folhas de papel, descrito pormenorizadamente nas secções 5.3-2, 5.3-3 e 5.3-4 do capítulo 5 desta tese, permite obter rapidamente e de uma forma simples as distribuições de intensidade dos padrões de difracção das réplicas das superfícies das folhas de papel. O processo de aquisição das distribuições de intensidade, relativas aos

padrões de difracção obtidos para cada ponto analisado, é controlado por um programa de aplicação que comanda uma mesa xy motorizada a qual permite a realização de deslocamentos precisos, sistemáticos ou aleatórios. Relativamente ao processamento das imagens digitais, resultantes da aquisição dos padrões de difracção de Fraunhofer das réplicas do papel, ele é realizado por aplicação de um algoritmo específico através do qual se obtêm em poucos segundos a anisotropia e o ângulo de orientação preferencial das fibras para cada um dos pontos analisados.

Tal como demonstrado nos vários exemplos apresentados na secção 5.3.1 do capítulo 5, obtidos por microscopia óptica, microscopia metalográfica e microscopia electrónica de varrimento, bem como através dos resultados, disponíveis na literatura, obtidos por técnicas utilizadas na indústria papelreira (lisura Bekk, rugosidade Bendtsen e rugosidade *IGT*) as réplicas são uma representação fiel da superfície da folha de papel. Além disso com a técnica implementada, para a produção de réplicas, conseguem-se produzir simultaneamente, e portanto nas mesmas condições, as réplicas correspondentes ambas as superfícies de uma folha de papel.

A análise por difracção laser de réplicas transparentes permite a quantificação da anisotropia e da orientação da distribuição das fibras à superfície das folhas de papel. Os padrões de difracção obtidos com o método proposto apresentam uma forma elíptica a qual está relacionada com o grau de orientação das fibras à superfície da folha de papel. Os parâmetros que se obtêm da análise dos padrões de difracção são a elipticidade de um contorno que melhor se ajusta aos referidos padrões de difracção e a orientação do eixo maior desse mesmo contorno. Estes dois parâmetros são suficientes para se poder representar a distribuição das fibras na superfície do papel, de acordo com o modelo do poro equivalente, sendo que a elipticidade (razão entre o comprimento dos dois eixos principais da elipse) corresponde à anisotropia (grau de orientação das fibras) e a direcção do eixo maior da elipse relativamente à direcção transversal da folha de papel, corresponde à orientação principal das fibras nesse ponto.

Os resultados obtidos, com o método da difracção laser, para a orientação das fibras demonstram que a orientação principal das fibras é aproximadamente a direcção de fabrico da folha (*DM*).

Os resultados da anisotropia e da orientação da distribuição das fibras podem ser apresentados sob a forma de mapas permitindo desta forma a identificação imediata de variações locais tanto de anisotropia como do ângulo de orientação das fibras.

Face à boa reproducibilidade dos resultados demonstrada pelo presente método pode afirmar-se que ele é preciso e muito sensível a variações tanto na anisotropia como na orientação das fibras à superfície da folha de papel. Para além disso, o método é rápido e está bem adaptado à obtenção de informação sobre a orientação das fibras no papel.

As correlações obtidas, quando se efectuam comparações entre os resultados obtidos com o método da difracção laser e com os resultados obtidos por outros métodos à muito implementados na indústria papelreira, foram elevados o que garante a credibilidade dos resultados obtidos.

O método proposto foi aplicado com sucesso na quantificação da anisotropia e da orientação da distribuição das fibras em papéis clivados, no estudo de defeitos existentes na superfície das folhas de papel ("marcas lineares"). Embora não exista referência nesta tese, o método proposto foi ainda aplicado com sucesso na área do papel no estudo da higroinstabilidade e curvatura das folhas de papel, e na área têxtil não tecidos no controlo da estiragem das fibras, na identificação de parâmetros estruturais e na caracterização da sua estrutura tridimensional.

A sensibilidade atingida na quantificação da anisotropia e orientação da distribuição das fibras á superfície da folha de papel, ligada à precisão dos resultados obtidos e à sua reproducibilidade, faz deste método uma boa contribuição para a investigação e desenvolvimento de estruturas fibrosas.

6.2 Trabalho futuro

Neste momento é possível, com os métodos ópticos desenvolvidos e implementados no decorrer desta tese, realizar análises da superfície e do volume de folhas de papel em condições estáticas. Esta análise é efectuada com base num método de difracção da luz laser em réplicas de folhas de papel para análise de superfície e num método de difusão da luz laser para análise no volume. Assim, é possível determinar a orientação das fibras à superfície das folha e a distribuição da densidade de massa, no seu volume, factores que influenciam altamente a qualidade do papel. O trabalho futuro será a implementação de um novo método óptico para uma análise desses parâmetros em simultâneo e na mesma região da folha de papel.

Existem presentemente algumas técnicas implementadas na indústria do papel capazes de realizar a análise dos parâmetros atrás referidos, mas nenhuma dessas técnicas permite aceder simultaneamente a ambos os parâmetros: a orientação das fibras e a densidade de massa na mesma região de uma folha de papel e discretizar simultaneamente a orientação das fibras à superfície e no seu volume.

O sistema a implementar e que é já alvo de uma candidatura a projecto de investigação e desenvolvimento, utilizará apenas para a análise na superfície da folha de papel a luz dispersa por retrodifusão a partir das superfícies do papel e a luz transmitida através da folha de papel para análise no seu volume. O sistema experimental será desenvolvido e implementado em ambas as faces da folha de papel para aquisição de dados sem contacto.

Esta nova aplicação corresponderá a uma valiosa e inovadora contribuição para o melhoramento da qualidade do papel tendo em vista a maioria das aplicações finais do papel, tais como: impressão,

transformação e metrologia, o que se converterá numa mais valia para os recursos nacionais em madeira e papel com os correspondentes benefícios sociais.

Publicações

A finalidade deste último capítulo é apresentar a lista de publicações resultantes deste trabalho tanto de artigos publicados em revistas da especialidade como de artigos apresentados e publicados em livros de resumos de Congressos e Conferências Nacionais e Internacionais da especialidade.

Artigos em Revistas de Especialidade

- [1] Fiadeiro, P.T., Pereira, M.J., Jesus, M.E.P., Silvy, J.J., “The surface measurement of fiber orientation anisotropy and misalignment angle by laser diffraction” in press *Journal of Pulp and Paper Science* (2002).

Artigos em Congressos e Conferências

Com apresentação oral

- Pereira, M.J., Costa, A.P., Belgacem, N., Fiadeiro, P.T., Silvy, J., “Surface characterization of paper by optical diffraction and interferometry” *Proceedings of Progress in Paper Physics - A Seminar*, **F5** (1998).
- Nunes, M.F., Pereira, M.J., Costa, A.P., “Controlo automático da distribuição isotrópica das fibras em artigos produzidos por técnicas de agulhagem”, *III Jornadas de Arqueologia Industrial*, UBI, (1998).
- Costa, A.P., Pereira, M.J., Fiadeiro, P.T., Silvy, J., “New method for the measurement of fibres orientation on the paper faces applied to the analysis of higo-instability in paper sheets”, *Proceedings of 4th International Symposium, Moisture and Creep Effect on Paper, Board and Containers*, editors: J.M. Serra-Tosio, Isabelle Vullienne, 173-188 (1999).
- Costa, A.P., Pinto, A., Figueiredo, J., Silvy, J., Pereira, M.J., Fiadeiro, P.T., “Estudo da orientação das fibras em folhas de papel por métodos ópticos”, *revista Pasta e Papel*, **23**, 26-27 (1999).
- Nunes, M.F., Pereira, M.J., “An optical system to control the anisotropy of fibre webs”, *Proceedings of International Seminar - Textile Science for XXI Century* 49 (1999).
- Salvado, L.R., Pereira, M.J., Silvy, J., Dréan, J.Y., “Identification des parametres de la texture des nontissés: mise en correlation avec les propriétés d'usage et les procédés de fabrication”, *Proceedings of Index 99 Congress* (1999).

- Salvado, L.R., Pereira, M.J., Dreán, J.Y., Silvy, J., “Relationship between Structure and Properties of Nonwoven Fabrics” *Proceedings of Spring 2000 Meeting - Sustainability and Recycling of Textile Materials (Fiber Society)*, 27-30 (2000).
- Nunes, M.F., Silva, M.E.C., Fiadeiro, P.T., Belino, N.R., Pereira, M.J., “Automatic control of fiber webs for nonwoven applications”, *Proceedings of Spring 2000 Meeting - Sustainability and Recycling of Textile Materials (Fiber Society)*, 23-25 (2000).
- Nunes, M.F., Silva, M.E.C., Belino, N.R., Pereira, M.J., “Use of image analysis to control anisotropy of fiber webs for nonwoven applications”, *Proceedings of 4th International Conference TEXSCI'2000* (2000).
- Pereira, M.J., Fiadeiro, P.T., “Paper surface diffraction to characterise the fibre orientation distribution”, *SPIE Proceedings* 4448-24, 159-168 (2001).
- Pereira, M.J., Fiadeiro, P.T., “Distribuição da orientação de fibras no papel: um estudo comparativo”, *Proceedings of Engenharia 2001 - Inovação e Desenvolvimento*, 111-116 (2001).

Com apresentação em póster

- Pereira, M.J., Fiadeiro, P.T., Roldán, L.G., “Paper as a multilayered structure: An optical approach”, *Proceedings of International Technical Symposium, 100 Years of the Fiber Society, Properties of Fiber Assemblies*, 6, (1998).
- Pereira, M.J., Fiadeiro, P.T., Costa, A.P., Belgacem, N., Silvy, J., “Métodos ópticos na caracterização da superfície de folhas de papel”, *Livro de resumos da 11ª Conferência Nacional de Física*, 625-626 (1998).
- Gomes, A.P., Costa, A.P., Pereira, M.J., Fiadeiro, P.T., Silvy, J., “Defeitos em papéis revestidos - Olho de peixe”, *Livro de resumos do 16º Encontro da Tecnicelpa* (1998).
- Pereira, M.J., Costa, A.P., Salvado, L.R., Silvy, J., Fiadeiro, P.T., “Structure of papers and nonwovens”, *Proceedings of Materiais 99*, vol. 2, 393-398 (1999).
- Pereira, M.J., Salvado, L.R., Fiadeiro, P.T., Silvy, J., “3-D Characterisation of Nonwoven Fabrics by Means of an Optical Method”, *Proceedings of Spring 2000 Meeting - Sustainability and Recycling of Textile Materials (Fiber Society)*, 155-158 (2000).

Apêndices

Apêndice 1

Tabela 5- 30 Ficheiro (parcial) resultante da análise efectuada à superfície da réplica.

```
@AAD 78 78 6 6 169 13 13 face A.aad  
4 102 0
```

```
(X,Y) Filename  
105 3 face A_1_105_3.bif  
111 3 face A_1_111_3.bif  
117 3 face A_1_117_3.bif  
123 3 face A_1_123_3.bif  
129 3 face A_1_129_3.bif  
135 3 face A_1_135_3.bif  
141 3 face A_1_141_3.bif  
147 3 face A_1_147_3.bif  
153 3 face A_1_153_3.bif  
159 3 face A_1_159_3.bif  
165 3 face A_1_165_3.bif  
171 3 face A_1_171_3.bif  
177 3 face A_1_177_3.bif  
105 9 face A_1_105_9.bif  
111 9 face A_1_111_9.bif  
117 9 face A_1_117_9.bif  
123 9 face A_1_123_9.bif  
129 9 face A_1_129_9.bif  
135 9 face A_1_135_9.bif  
141 9 face A_1_141_9.bif  
147 9 face A_1_147_9.bif  
153 9 face A_1_153_9.bif  
159 9 face A_1_159_9.bif  
165 9 face A_1_165_9.bif  
171 9 face A_1_171_9.bif  
177 9 face A_1_177_9.bif
```

```
face A_scan_1.bif  
face A_scan_2.bif  
face A_scan_3.bif  
face A_scan_4.bif
```

```
Scanning Time: 0:31:10  
ptfX@CFG_V4.0 - Sun Feb 11 22:58:33 WET 2001
```

Tabela 5- 31 Ficheiro (parcial) resultante da aplicação do processamento automático aos padrões de difracção adquiridos.

X	Y	a/b	Angle C	Angle	Thr
@APD 78 78 6 6 169 13 13 25 4 10 100 90D face A.aad face A.apd					
4 102 0					
105	3	1.53	3.59	3.59	12
111	3	1.58	3.59	3.59	64
117	3	1.52	0.00	0.00	46
123	3	1.51	0.90	0.90	37
129	3	1.61	3.59	3.59	80
135	3	1.78	-0.45	179.55	97
141	3	1.60	-0.90	179.10	54
147	3	1.76	-0.45	179.55	99
153	3	1.76	-0.45	179.55	100
159	3	1.50	2.69	2.69	13
165	3	1.57	-0.45	179.55	46
171	3	1.57	11.96	11.96	34
177	3	1.69	4.93	4.93	87
105	9	1.61	10.66	10.66	30
111	9	1.47	2.69	2.69	47
117	9	1.56	6.71	6.71	82
123	9	1.60	-1.80	178.20	73
129	9	1.78	3.14	3.14	82
135	9	1.74	2.69	2.69	74
141	9	1.65	2.25	2.25	72
147	9	1.73	-0.45	179.55	99
153	9	1.76	-0.45	179.55	81
159	9	1.57	1.35	1.35	87
165	9	1.43	7.15	7.15	10
171	9	1.61	7.59	7.59	27
177	9	1.71	-3.14	176.86	91
Scan-1	1.60	-0.45	179.55	48	
Scan-2	1.66	0.90	0.90	82	
Scan-3	1.65	0.90	0.90	77	
Scan-4	1.55	0.00	0.00	24	
Processing Time: 2: 7:53					
ptfX@CFG_V4.0 - Mon Feb 12 02:11:53 WET 2001					

Tabela 5- 32 Ficheiro final (parcial) resultante da realização da análise a uma réplica da superfície de uma folha de papel.

Diffraction Mapping	ptfX@CFG_V4.0 - Mon Feb 12 09:38:17 WET 2001											
Source File:	face A.aad	Processed File:	face A_d.txt (.apd)									
Sampled Area (mm):	78x 78	Offset (mm):	102x 0									
Beam Size (mm):	6	Beam Step (mm):	6									
Rejection Factor:	25	Smooth Power Factor:	4									
Initial Threshold:	10	Final Threshold:	100									
Scanned Data Average												
Minimum Threshold:	17	Maximum Threshold:	96									
Mean Angle:	1.96 deg	Std Angle:	2.99 deg									
Mean a/b:	1.62	Std Ratio a/b:	0.094									
Line 1 - X:[0,78] mm, Y:[0,6[mm												
1.53	1.58	1.52	1.51	1.61	1.78	1.60	1.76	1.76	1.50	1.57	1.57	1.69
3.59	3.59	0.00	0.90	3.59	-0.45	-0.90	-0.45	-0.45	2.69	-0.45	11.96	4.93
Line 2 - X:[0,78] mm, Y:[6,12[mm												
1.61	1.47	1.56	1.60	1.78	1.74	1.65	1.73	1.76	1.57	1.43	1.57	1.69
10.66	2.69	6.71	-1.80	3.14	2.69	2.25	-0.45	-0.45	1.35	7.15	11.96	4.93
Accumulated Scanned Data 1												
Threshold:	48											
Angle:	-0.45 deg											
a/b:	1.60											
Accumulated Scanned Data 2												
Threshold:	82											
Angle:	0.90 deg											
a/b:	1.66											
Accumulated Scanned Data 3												
Threshold:	77											
Angle:	0.90 deg											
a/b:	1.65											
Accumulated Scanned Data 4												
Threshold:	24											
Angle:	0.00 deg											
a/b:	1.55											

Apêndice 2

Tabela 5- 33 Anisotropia média acumulada e ângulo de orientação médio acumulado da distribuição de fibras em função do número de imagens adquiridas para o mesmo ponto para duas réplicas diferentes (1 a 30 imagens).

Nº de imagens adquiridas	Réplica 1				Réplica 2			
	Anisotropia		Ângulo de orientação		Anisotropia		Ângulo de orientação	
	a/b	Média acumul.	(°)	Média acumul.	a/b	Média acumul.	(°)	Média acumul.
1	1.66	1.66	0.90	0.90	1.30	1.30	0.90	0.90
2	1.75	1.71±0.04	0.40	0.65±0.25	1.30	1.30±0.00	-2.70	-0.90±1.80
3	1.73	1.71±0.04	0.90	0.73±0.24	1.27	1.29±0.01	-11.50	-4.43±5.21
4	1.70	1.71±0.03	0.40	0.65±0.25	1.30	1.29±0.01	-1.80	-3.78±4.65
5	1.70	1.71±0.03	0.40	0.60±0.24	1.32	1.30±0.02	-0.40	-3.10±4.37
6	1.72	1.71±0.03	3.10	1.02±0.96	1.30	1.30±0.01	4.00	-1.92±4.79
7	1.63	1.70±0.04	6.30	1.77±2.05	1.29	1.30±0.01	-12.00	-3.36±5.67
8	1.76	1.71±0.04	0.40	1.60±1.97	1.30	1.30±0.01	-0.40	-2.99±5.39
9	1.67	1.70±0.04	3.60	1.82±1.96	1.28	1.30±0.01	1.80	-2.46±5.30
10	1.64	1.70±0.04	-0.40	1.60±1.98	1.30	1.30±0.01	0.00	-2.21±5.08
11	1.71	1.70±0.04	0.00	1.45±1.94	1.36	1.30±0.02	-0.40	-2.05±4.87
12	1.67	1.70±0.04	1.30	1.44±1.86	1.29	1.30±0.02	-0.90	-1.95±4.68
13	1.73	1.70±0.04	0.90	1.40±1.79	1.38	1.31±0.03	-0.40	-1.83±4.51
14	1.72	1.70±0.04	-0.90	1.24±1.82	1.34	1.31±0.03	1.30	-1.61±4.42
15	1.64	1.70±0.04	3.60	1.39±1.86	1.37	1.31±0.03	-0.40	-1.53±4.28
16	1.60	1.69±0.05	2.20	1.44±1.81	1.34	1.32±0.03	-0.40	-1.46±4.16
17	1.80	1.70±0.05	-0.90	1.31±1.84	1.26	1.31±0.03	4.90	-1.08±4.30
18	1.65	1.69±0.05	0.90	1.28±1.79	1.30	1.31±0.03	-0.40	-1.04±4.18
19	1.66	1.69±0.05	-0.40	1.19±1.78	1.29	1.31±0.03	0.00	-0.99±4.08
20	1.61	1.69±0.05	7.20	1.50±2.18	1.28	1.31±0.03	3.10	-0.78±4.07
21	1.66	1.69±0.05	0.90	1.47±2.13	1.30	1.31±0.03	0.90	-0.70±3.99
22	1.75	1.69±0.05	0.40	1.42±2.09	1.30	1.31±0.03	-2.70	-0.80±3.92
23	1.73	1.69±0.05	0.90	1.40±2.05	1.27	1.31±0.03	-11.50	-1.26±4.41
24	1.70	1.69±0.05	0.40	1.35±2.01	1.30	1.31±0.03	-1.80	-1.28±4.32
25	1.70	1.69±0.05	0.40	1.32±1.98	1.32	1.31±0.03	-0.40	-1.25±4.24
26	1.72	1.69±0.05	3.10	1.38±1.97	1.30	1.31±0.03	4.00	-1.05±4.28
27	1.63	1.69±0.05	6.30	1.57±2.15	1.29	1.31±0.03	-12.00	-1.45±4.68
28	1.76	1.69±0.05	0.40	1.53±2.12	1.30	1.31±0.03	-0.40	-1.41±4.60
29	1.67	1.69±0.05	3.60	1.60±2.12	1.28	1.30±0.03	1.80	-1.30±4.56
30	1.64	1.69±0.05	-0.40	1.53±2.11	1.30	1.30±0.03	0.00	-1.26±4.49

(continuação)

Tabela 5- 33 Anisotropia média acumulada e ângulo de orientação médio acumulado da distribuição de fibras em função do número de imagens adquiridas para o mesmo ponto para duas réplicas diferentes (31 a 60 imagens).

Nº de Imagens Adquiridas	Réplica 1				Réplica 2			
	Anisotropia		Ângulo de orientação		Anisotropia		Ângulo de orientação	
	a/b	Média acumul.	(°)	Média acumul.	a/b	Média acumul.	(°)	Média acumul.
31	1.71	1.69±0.05	0.00	1.48±2.10	1.36	1.31±0.03	-0.40	-1.23±4.42
32	1.67	1.69±0.05	1.30	1.48±2.06	1.29	1.31±0.03	-0.90	-1.22±4.35
33	1.73	1.69±0.05	0.90	1.46±2.03	1.38	1.31±0.03	-0.40	-1.20±4.28
34	1.72	1.69±0.05	-0.90	1.39±2.04	1.34	1.31±0.03	1.30	-1.12±4.24
35	1.64	1.69±0.05	3.60	1.45±2.05	1.37	1.31±0.03	-0.40	-1.10±4.18
36	1.60	1.69±0.05	2.20	1.47±2.02	1.34	1.31±0.03	-0.40	-1.08±4.12
37	1.80	1.69±0.05	-0.90	1.41±2.03	1.26	1.31±0.03	4.90	-0.92±4.18
38	1.65	1.69±0.05	0.90	1.39±2.01	1.30	1.31±0.03	-0.40	-0.91±4.13
39	1.66	1.69±0.05	-0.40	1.35±2.00	1.29	1.31±0.03	0.00	-0.88±4.08
40	1.61	1.69±0.05	7.20	1.50±2.18	1.28	1.31±0.03	3.10	-0.79±4.07
41	1.66	1.69±0.05	0.90	1.48±2.15	1.30	1.31±0.03	0.90	-0.74±4.03
42	1.75	1.69±0.05	0.40	1.45±2.13	1.30	1.31±0.03	-2.70	-0.79±3.99
43	1.73	1.69±0.05	0.90	1.44±2.11	1.27	1.31±0.03	-11.50	-1.04±4.26
44	1.70	1.69±0.05	0.40	1.42±2.09	1.30	1.31±0.03	-1.80	-1.06±4.22
45	1.70	1.69±0.05	0.40	1.40±2.07	1.32	1.31±0.03	-0.40	-1.04±4.17
46	1.72	1.69±0.05	3.10	1.43±2.06	1.30	1.31±0.03	4.00	-0.93±4.19
47	1.63	1.69±0.05	6.30	1.54±2.16	1.29	1.31±0.03	-12.00	-1.17±4.44
48	1.76	1.69±0.05	0.40	1.51±2.14	1.30	1.31±0.03	-0.40	-1.15±4.40
49	1.67	1.69±0.05	3.60	1.56±2.14	1.28	1.31±0.03	1.80	-1.09±4.37
50	1.64	1.69±0.05	-0.40	1.52±2.14	1.30	1.31±0.03	0.00	-1.07±4.33
51	1.71	1.69±0.05	0.00	1.49±2.13	1.36	1.31±0.03	-0.40	-1.06±4.29
52	1.67	1.69±0.05	1.30	1.48±2.11	1.29	1.31±0.03	-0.90	-1.05±4.25
53	1.73	1.69±0.05	0.90	1.47±2.09	1.38	1.31±0.03	-0.40	-1.04±4.21
54	1.72	1.69±0.05	-0.90	1.43±2.09	1.34	1.31±0.03	1.30	-1.00±4.18
55	1.64	1.69±0.05	3.60	1.47±2.09	1.37	1.31±0.03	-0.40	-0.99±4.14
56	1.60	1.69±0.05	2.20	1.48±2.08	1.34	1.31±0.03	-0.40	-0.98±4.11
57	1.80	1.69±0.05	-0.90	1.44±2.08	1.26	1.31±0.03	4.90	-0.87±4.14
58	1.65	1.69±0.05	0.90	1.43±2.07	1.30	1.31±0.03	-0.40	-0.87±4.11
59	1.66	1.69±0.05	-0.40	1.40±2.06	1.29	1.31±0.03	0.00	-0.85±4.08
60	1.61	1.69±0.05	7.20	1.50±2.18	1.28	1.31±0.03	3.10	-0.79±4.07

Tabela 5- 34 Valores da anisotropia e do ângulo de orientação da distribuição de fibras para o mesmo ponto para duas réplicas diferentes.

Nº de repetições	Réplica 1				Réplica 2			
	Anisotropia	% de erro	Âng. orientação	Desv. média	Anisotropia	% de erro	Âng. orientação	Desv. média
1	1.69	0.41	1.30	0.82	1.34	1.86	0.40	0.26
2	1.71	0.77	0.90	0.42	1.30	1.18	0.00	0.66
3	1.7	0.18	0.90	0.42	1.33	1.10	0.90	0.25
4	1.73	1.94	0.00	0.49	1.31	0.42	0.90	0.25
5	1.71	0.77	0.40	0.09	1.30	1.18	1.80	1.15
6	1.71	0.77	0.40	0.09	1.31	0.42	0.00	0.66
7	1.71	0.77	0.40	0.09	1.31	0.42	0.40	0.26
8	1.70	0.18	0.40	0.09	1.33	1.10	1.30	0.65
9	1.63	3.95	0.00	0.49	1.31	0.42	0.40	0.26
10	1.70	0.18	1.30	0.82	1.35	2.62	0.90	0.25
11	1.70	0.18	0.40	0.09	1.30	1.18	0.40	0.26
12	1.70	0.18	0.40	0.09	1.29	1.94	0.00	0.66
13	1.69	0.41	0.40	0.09	1.31	0.42	0.90	0.25
14	1.70	0.18	0.90	0.42	1.34	1.86	0.90	0.25
15	1.70	0.18	0.40	0.09	1.32	0.34	0.90	0.25
16	1.73	1.94	0.40	0.09	1.30	1.18	0.00	0.66
17	1.70	0.18	0.40	0.09	1.33	1.10	1.30	0.65
18	1.70	0.18	0.00	0.49	1.30	1.18	0.40	0.26
19	1.63	3.95	0.00	0.49	1.31	0.42	0.00	0.66
20	1.70	0.18	0.40	0.09	1.32	0.34	1.30	0.65
Média	1.70	0.87	0.49	0.29	1.32	1.03	0.655	0.455
Des. padrão	0.02		0.38		0.02		0.52	
Valor máx.	1.73	3.95	1.30	0.82	1.35	2.62	1.80	1.15

Tabela 5- 35 Valores da anisotropia, ângulo de orientação e respectivos desvios padrão em função do número de varrimentos sequenciais completos para a face feltro.

Nº de Repetições	FACE FELTRO					
	Anisotropia da distribuição de fibras			Ângulo de orientação da dist. de fibras		
	a/b	Média	Desv. padrão	(°)	Média (°)	Desv. padrão (°)
1	1.64	1.64	0.02	2.10	2.13	3.31
2	1.64		0.02	1.99		3.23
3	1.64		0.35	2.03		3.28
4	1.63		0.25	2.17		3.35
5	1.63		0.37	2.05		3.47
6	1.64		0.02	2.06		3.35
7	1.63		0.23	1.84		3.33
8	1.63		0.47	1.90		3.31
9	1.64		0.28	2.48		3.47
10	1.64		0.23	2.14		3.46
11	1.64		0.20	2.26		3.38
12	1.63		0.42	2.11		3.48
13	1.64		0.30	2.23		3.54
14	1.64		0.12	1.85		3.40
15	1.63		0.13	2.18		3.43
16	1.64		0.14	2.09		3.18
17	1.64		0.04	1.97		3.61
18	1.63		0.19	2.08		3.52
19	1.64		0.17	2.49		3.33
20	1.64		0.03	2.65		3.59
21	1.64		0.30	1.91		3.31
22	1.63		0.28	2.12		3.12
23	1.63		0.08	2.09		3.45
24	1.64		0.23	1.94		3.39
25	1.63		0.23	2.06		3.43
26	1.63		0.52	2.19		3.44
27	1.64		0.17	2.43		3.47
28	1.64		0.26	2.26		3.56
29	1.64		0.18	1.88		3.43
30	1.64		0.01	2.44		3.50
31	1.64		0.05	2.20		3.47
32	1.64		0.26	1.85		3.15

Tabela 5- 36 Valores da anisotropia, ângulo de orientação e respectivos desvios padrão em função do número de varrimentos sequenciais completos para a face teia.

Nº de Repetições	FACE TEIA					
	Anisotropia da distribuição de fibras			Ângulo de orientação da dist. de fibras		
	a/b	Média	Desv. padrão	(°)	Média (°)	Desv. padrão (°)
1	1.62	1.62	0.11	1.78	2.08	3.76
2	1.62		0.11	2.10		3.54
3	1.62		0.11	1.80		3.78
4	1.61		0.11	2.17		3.78
5	1.62		0.11	1.87		3.68
6	1.63		0.11	2.02		3.68
7	1.62		0.11	1.95		3.15
8	1.62		0.11	2.05		3.21
9	1.62		0.10	1.85		3.46
10	1.61		0.11	1.74		3.65
11	1.62		0.10	1.81		3.47
12	1.62		0.11	2.11		3.75
13	1.61		0.11	2.02		3.61
14	1.62		0.11	1.91		3.44
15	1.62		0.11	1.92		3.36
16	1.62		0.10	2.23		3.85
17	1.62		0.10	1.93		3.58
18	1.62		0.11	2.24		3.48
19	1.61		0.10	2.10		3.72
20	1.62		0.11	1.91		3.37
21	1.62		0.11	1.98		3.40
22	1.62		0.10	2.54		3.45
23	1.63		0.11	2.11		3.69
24	1.62		0.11	2.08		3.88
25	1.62		0.10	2.55		3.84
26	1.62		0.10	2.48		3.93
27	1.62		0.11	2.57		4.16
28	1.62		0.11	2.43		3.62
29	1.62		0.11	2.20		4.38
30	1.62		0.10	2.16		3.38
31	1.62		0.11	1.72		3.83
32	1.62		0.10	2.37		4.10

Apêndice 3

Tabela 5- 37 Espessuras do papel de impressão antes e depois de efectuada a clivagem.

Papel de impressão (valores em mm)					
Folha não Plastificada	Folha plastificada	Folha cliv. e plast.		Folha clivada	
		<i>Parte A</i>	<i>Parte B</i>	<i>Parte A</i>	<i>Parte B</i>
0.107	0.396	0.195	0.200	0.051	0.056
0.108	0.393	0.194	0.201	0.052	0.059
0.106	0.395	0.194	0.201	0.050	0.057
0.107	0.394	0.196	0.202	0.053	0.059
0.108	0.396	0.193	0.200	0.049	0.056
0.107	0.396	0.194	0.201	0.050	0.057
0.109	0.397	0.194	0.201	0.050	0.057
0.107	0.395	0.195	0.200	0.051	0.056
Média	0.107	0.395	0.194	0.201	0.051
Desv. padrão	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

Tabela 5- 38 Espessuras do papel kraft antes e depois de efectuada a clivagem.

Papel kraft liner (valores em mm)					
Folha não Plastificada	Folha plastificada	Folha cliv. e plast.		Folha clivada	
		<i>Parte A</i>	<i>Parte B</i>	<i>Parte A</i>	<i>Parte B</i>
0.173	0.396	0.184	0.252	0.073	0.141
0.173	0.393	0.187	0.253	0.077	0.143
0.170	0.403	0.180	0.255	0.064	0.139
0.168	0.401	0.183	0.262	0.067	0.146
0.172	0.403	0.182	0.254	0.067	0.139
0.174	0.397	0.181	0.245	0.070	0.134
0.171	0.402	0.184	0.253	0.069	0.138
0.173	0.403	0.182	0.259	0.067	0.144
Média	0.172	0.400	0.183	0.254	0.069
Desv. padrão	0.002	0.004	0.002	0.005	0.004