

PRODUÇÃO DE POLIPROPILENO BI-ORIENTADO (BOPP): TECNOLOGIA E APLICAÇÕES

Lídia Barbosa Carvalho

*Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e de
Gestão de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Química*

Orientado por
Prof. Filomena Barreto

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo Júri

Bragança
2007/2008

SUMÁRIO

Este trabalho tem por base elaborar um estudo sobre filmes BOPP (*Biaxially Oriented Polypropylene*): Tecnologia e aplicações. O trabalho inicia-se com uma breve introdução, onde são abordados a origem dos polímeros, o aparecimento do polipropileno e a sua evolução ao longo do tempo até à sua posição no mercado actual. Num segundo ponto será descrito a forma de obtenção do polipropileno (PP), sua estrutura e suas propriedades.

Adicionalmente é apresentado um resumo das tecnologias usualmente empregues no processamento de filmes BOPP: processo por sopro em dupla camada; processo por estiramento simultâneo ou bi-direcional, processo de estiramento plano em duas fases (o mais utilizado, representa cerca de 90%), sendo por isso o processo que será mais aprofundado.

Os filmes BOPP mais comuns são os transparentes, mas também existem no mercado filmes BOPP brancos, perlados e mates (estes últimos com um crescimento significativo de utilização); e em menor quantidade os pigmentados de várias cores. Não é só o processo que é importante na produção do filme BOPP, este deve obedecer a alguns requisitos, tanto ao nível das diferentes matérias – primas utilizadas como ao nível do controlo do produto final. Desta forma, serão abordados os diferentes testes de qualidade a que o filme é sujeito antes de ser aprovado.

ABSTRAT

This work is focused on the production of BOPP (*Biaxially Oriented Polypropylene*) films: Technology and applications. The work starts with a brief historical background of polymeric materials including polypropylene itself. Propylene evolution and its current market position are also discussed.

Additionally, a summary of the most applied technologies for the production of BOPP films is presented: blow process for biaxially oriented film; process of simultaneous bi-directional stretching, tenter process for biaxially oriented film. The last process is the most used (about 90%) and thereafter it will be described more detailed during the present work.

Most of the produced BOPP films are transparent. Nevertheless we can also found commercially, pearl type films, matt films (the latter with a significant increase of use) and, with less commercial importance, pigmented films using several colors.

Beyond the study of the process, it is also important to control the quality of the used raw-materials and final properties. For that purpose, different test methodologies will be described.

Índice geral

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Breve introdução histórica aos materiais poliméricos	1
1.2. Polipropileno bi-orientado (BOPP): Mercado e aplicações	3
1.3. Objectivos e motivação	4
2. OBTENÇÃO, ESTRUTURA E PROPRIEDADES DO POLIPROPILENO	5
2.1. Matérias-primas e síntese	5
2.2. Propriedades	7
2.3. Propriedades mecânicas	10
2.4. Formulação e aditivos para a produção de filmes de BOPP	10
2.5. Efeito da orientação nas características dos filmes	11
3. PRODUÇÃO DE FILMES BOPP	13
3.1. Tecnologias de produção existentes	13
3.2. Descrição do processo existente na empresa	14
3.3. Formas de apresentação dos filmes BOPP	29
3.4. Controlo de qualidade e metodologias de caracterização	31
4. CONCUSÃO E TRABALHO FUTURO	36
5. BIBLIOGRAFIA	37

Índice de Figuras

Figura 1: Resumo cronológico da evolução dos materiais poliméricos	3
Figura 2: Evolução do mercado do filme BOPP	3
Figura 3: Esquema da refinação do petróleo	5
Figura 4: Esquema da polimerização do propeno em propileno	6
Figura 5: Distribuição estatística das moléculas de propileno e etileno	6
Figura 6: Configuração do polipropileno segundo a sua taticidade	7
Figura 7: Esquema do processo tubular	14
Figura 8: Esquema do processo estiramento plano em duas fases	15
Figura 9: Esquema do percurso dos diversos componentes	16
Figura 10: Esquema de uma extrusora	18

Figura 11: Boca da laminadora para filme plano e filme de três capas	19
Figura 12: Esquema do <i>chill roll</i>	20
Figura 13: Esquema do MDO	20
Figura 14: O filme á saída do MDO	22
Figura 15: Esquema do TDO	22
Figura 16: Estiro no TDO	24
Figura 17: esquema geral do "Pull Roll"	24
Figura 18: Corte dos bordes	25
Figura 19: Tratamento corona	26
Figura 20: Tratamento chama	27
Figura 21: Esquema da bobinagem de uma bobina	28
Figura 22: Esquema do corte de uma bobina	29

Índice de tabelas

Tabela 1: Variação das propriedades com o nível de a taticidade	8
Tabela 2: Efeitos da orientação no polipropileno	12

1. INTRODUÇÃO

1.1. Breve introdução histórica aos materiais poliméricos

As origens dos polímeros situam-se no início do século XIX, quando em Inglaterra, Hancock descobriu o efeito da "mastigação" da borracha natural a que se seguiu, em 1843, a patente da vulcanização da borracha por meio do enxofre, diminuindo o poder adesivo e melhorando as propriedades elásticas. Na realidade, já em 1839, Goodyear, na América do Norte, tinha apresentado de forma independentemente uma patente semelhante e, mais tarde, em 1851 viria a descobrir a ebonite, iniciando assim o desenvolvimento dos plásticos termoendurecíveis ^{[1][2]}.

A era da produção de materiais poliméricos correspondeu à modificação de polímeros existentes natureza, isto é, obtinham-se materiais com propriedades interessantes por modificação química dos polímeros naturais. Por exemplo, em 1862 em Londres, surgiram diversas aplicações de uso doméstico moldadas a partir de uma mistura de nitrato de celulose e óleo de castor. A primeira experiência comercial bem sucedida neste campo deve-se a J.W. Hyatt que, em 1870, nos E.U.A., produziu o celulóide usando cânfora como plastificante do nitrato de celulose. Devido á sua elevada inflamabilidade o celulóide converteu-se mais tarde num material de risco, havendo necessidade de procurar materiais alternativos mais estáveis ^{[1][2]}.

Os plásticos baseados no acetato de celulose e na caseína foram desenvolvidos no princípio do século XX. Aproximadamente em 1910, o químico belga Leo Baekeland descobriu e comercializou a *bakelite* um polímero obtido a partir de fenol e de formaldeído. Actualmente, este material ainda é utilizado em diversas aplicações. É facilmente moldável e o seu sucesso contribuiu para reforçar a investigação que conduziu mais tarde à descoberta das resinas de ureia – formaldeído ^{[1][2]}.

Em 1917 os químicos alemães desenvolveram uma borracha sintética a partir do dimetilbutadieno, cujas propriedades, embora incomparavelmente inferiores às da borracha natural, serviu como ponto de partida para a importantíssima indústria da borracha sintética ^{[1][2]}.

Até ao início da década de 20, não foi possível um verdadeiro desenvolvimento na indústria dos polímeros dado a ausência de conhecimentos fundamentais sobre a estrutura dos materiais poliméricos. Se bem que se soubesse que os produtos naturais tinham pesos moleculares elevados, a ideia de macromolécula era ainda olhada com cepticismo pela maior parte dos cientistas. Até 1930, o ponto de vista mais corrente era que estas moléculas aparentemente "grandes" seriam agregados coloidais de moléculas pequenas, mantidas como micelas por forças de atracção secundárias. A partir da investigação feita por Hermann Staudinger aceitou-se a ideia

de estas moléculas serem longas sequências de unidades estruturais menores, ligadas entre si por ligações covalentes, formando “macromoléculas” ^{[1][2]}.

Mais tarde, em 1933, Gibson e outros investigadores da ICI, descobriram o polietileno. Posteriormente, em 1934, Carothers da Dupont, descobriu o nylon e desenvolveu as bases da investigação sobre a teoria das reacções de polimerização. Por esta altura, Hill e Crawford da ICI, sintetizaram o polimetacrilato de metilo. Também nessa época se iniciou a produção do poliestireno e do poli (cloreto de vinilo). Em 1939 a ICI começou a produzir industrialmente o polietileno de alta pressão. Após a 2ª Guerra Mundial, intensificou-se, quer a investigação científica quer o desenvolvimento industrial dos materiais poliméricos. Grande parte dos polímeros poliolefinicos são resultado directo da investigação de Ziegler e Natta que desenvolveram catalizadores de polimerização organometálicos que permitiram obter, na década de 50, o polietileno de alta densidade e o polipropileno. Outros polímeros foram igualmente desenvolvidos tais como, os poliuretanos (1937), os epóxidos (1939), o politetrafluoretileno (1941), os silicones (1942), as poliimidas (1964), constituindo os materiais de base utilizados na indústria transformadora de polímeros ^{[1][2]}. A Figura 1 mostra um resumo por ordem cronológica do desenvolvimento dos materiais poliméricos

1835- *Regnault apresenta o monómero de cloreto de vinil.*

1838- *É descoberto o nitrato de celulose.*

1839- *Charles Goodyear descobre o processo de vulcanização da borracha.*

1865- *É descoberto o acetato de celulose.*

1870- *Irmãos Hyatt patenteiam a celulóide.*

1884- *Hilaire Chardonnet inventa a primeira fibra sintética, a rayon de viscose.*

1905- *Brandenburg inventa a celofane.*

1909- *Leo Baekeland descobre a baquelita.*

1922- *Hermann Staudinger sintetiza a borracha.*

1928- *Ziegler começa a estudar a química orgânica princípio da descoberta do PE e PP.*

1929- *A empresa Dunlop cria a primeira borracha de espuma.*

1931- *J. A Hansbeke desenvolve o neoprene.*

1933- *Primeiros produtos injectados com Poliestireno.*

1938- *Começa produção comercial de Poliestireno.*

1938- *Roy Plunkett descobre o PTFE.*

1939- *ICI patenteia a coloração do Polietileno.*

1940- *O PMMA começa a ser utilizado na aviação.*

1948- *George deMestral inventa o Velcro.*

- 1950-** O Poliestireno de alto impacto começa a ser produzido comercialmente.
- 1952-** Começa aparecer os primeiros produzidos fabricados em PVC.
- 1953-** O Polietileno de alta densidade começa a ser produzido comercialmente.
- 1954-** O Polipropileno começa a ser desenvolvido com o uso de catalisadores de Ziegler-Natta.
- 1958-** O Policarbonato começa a ser produzido.
- 1963-** Ziegler e Natta ganham o Prémio Nobel de Química.

Figura 1: Resumo cronológico da evolução dos materiais poliméricos.

1.2. Polipropileno bi-orientado (BOPP): Mercado e aplicações

Desde a sua introdução em 1954, o polipropileno se tornou uma das mais importantes resinas termoplásticas da actualidade, continuando ainda como a resina de maior crescimento. A procura do filme de polipropileno cresceu, desde 2000, em média 8,7% ao ano tendo alcançado cerca de 5 milhões de toneladas em 2007. A fim de acompanhar este crescimento, a indústria mundial tem vindo a aumentar a capacidade de produção, estimando-se em cerca de 85% esse crescimento, também desde 2000. Este crescimento tem especial relevo na região da Ásia Central e Oriental, o que inclui a Coreia do Sul, Japão e China ^[7].

As previsões mostram que a procura mundial de filme BOPP vai continuar a crescer, em média, 6,8% ao ano prevendo-se chegar a 7,8 milhões de toneladas até 2012. Espera-se que o crescimento da região asiática represente três quartos do crescimento mundial nos próximos cinco anos ^[7]. A Figura 2 mostra a evolução do mercado do filme BOPP apresentando projecções até 2012.

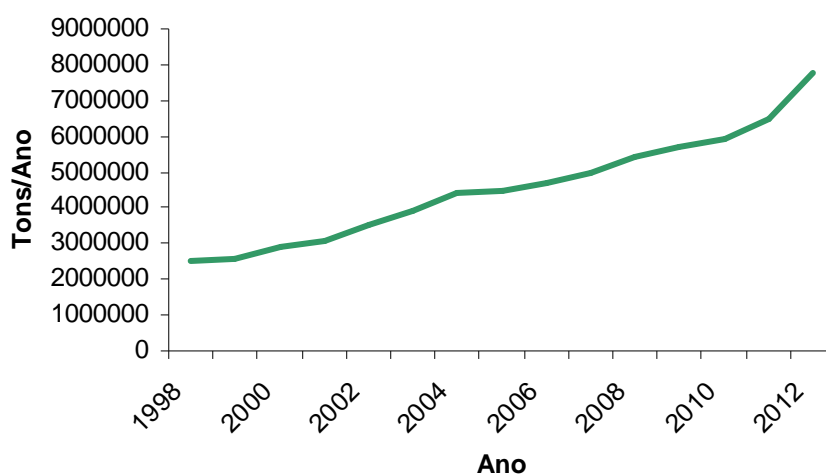


Figura 2: Evolução do mercado do filme BOPP ^[18].

O polipropileno extrudido tem um processo de fabrico muito semelhante ao do polietileno de alta densidade, até porque suas características químicas são muito parecidas. Apresenta-se em filmes e películas para embalagens de diferentes usos, tendo a sua maior aplicação na indústria alimentar. Quando é empregado na embalagem final do produto, o polipropileno pode ser combinado com outros plásticos, ou com lâminas de alumínio para aumentar a sua resistência mecânica e a permeabilidade a gases.

As principais vantagens que tornam o BOPP um material em expansão para o fabrico de embalagens flexíveis, em detrimento dos outros materiais incluem ^[8]:

- Baixo custo
- Elevada resistência química a solventes
- Fácil moldagem
- Fácil coloração
- Alta resistência à fractura por flexão ou fadiga
- Boa resistência ao impacto acima de 15°C
- Boa estabilidade térmica
- Maior sensibilidade à luz UV e agentes de oxidação, sofrendo degradação com maior facilidade.

1.3. Objectivos e motivação

Considerando o que já foi exposto, este trabalho tem por objectivo elaborar um estudo acerca de filmes de BOPP. O trabalho explorará e caracterizará as três tecnologias usualmente empregadas no processamento de tais filmes: (1) processo de estiramento plano em duas fases; processo por sopro em dupla camada; (2) processo estiramento simultâneo ou bi-direcional e (3) estiramento plano em duas fases. O processo três será o mais explorado.

2. OBTENÇÃO, ESTRUTURA E PROPRIEDADES DO POLIPROPILENO

2.1. Matérias-primas e síntese

O polipropileno (PP) é um polímero obtido através da polimerização do propileno (propeno), um subproduto gasoso da refinação do petróleo. A figura 3 mostra o esquema da refinação do petróleo e a forma de obtenção do propeno.

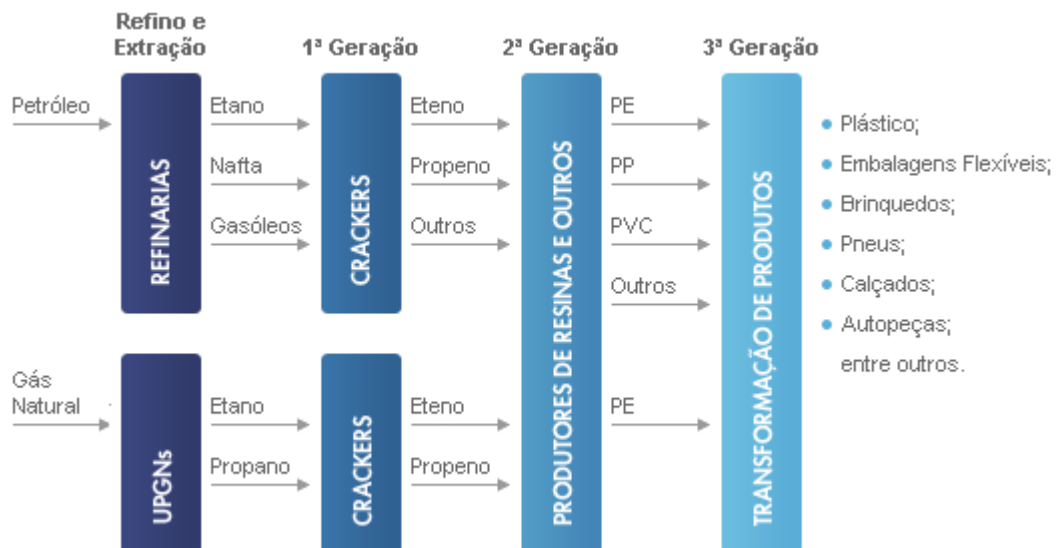


Figura 3: Esquema da refinação do petróleo [7].

O refinado consiste na separação dos distintos componentes do petróleo por acção do calor. É uma destilação fraccionada em que se separa a diferentes intervalos de temperatura misturas de compostos de tamanho e composição similar.

Das fracções obtidas, a nafta que é uma mistura de hidrocarbonetos com mais de cinco átomos de carbono e que tem um ponto de ebulição até 150 °C, tem sido utilizada para a fabricação dos plásticos.

Para a produção do filme BOPP são necessários dois tipos de matéria-prima:

- Homopolímero de polipropileno para o substrato do filme co-extrudido
- Copolímero de polipropileno para a capa superficial do filme co-extrudido.

O polipropileno é um polímero cristalino produzido pela polimerização de moléculas de propileno podendo observar-se na figura 4 o esquema da polimerização do propileno em propileno.

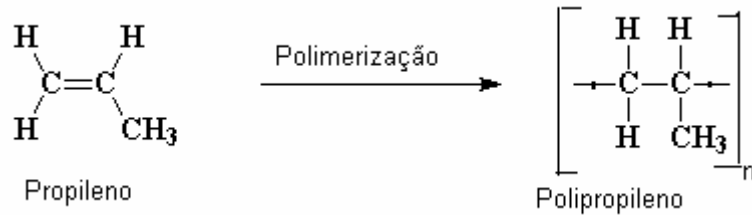


Figura 4: Esquema da polimerização do propeno em propileno.

a) Homopolímero de Polipropileno

O método de fabricação usual é a polimerização mediante suspensão num solvente.

No reactor introduzem-se os seguintes reagentes:

- Propileno, como monómero
- Hexano, como solvente
- Hidrogénio, como catalizador.

O peso molecular determina o comportamento do homopolímero na produção do BOPP, a viscosidade do fundido aumenta com o aumento ou peso molecular, por isso, a capacidade do homopolímero para fluir através da laminadora é afectada. Por outro lado, a capacidade do fundido para manter a sua forma quando sai da laminadora melhora com o aumento do peso molecular.

O catalisador determina a distribuição do peso molecular, isto é, a distribuição do peso molecular em torno do valor médio, por outro lado, também tem influência a taticidade do polipropileno.

b) Copolímero de polipropileno-etileno

Na produção do copolímero são utilizados propileno e o etileno. O copolímero é um copolímero do tipo aleatório (Figura 5).

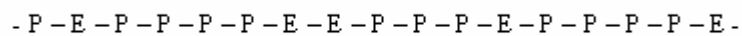


Figura 5: Distribuição estatística das moléculas de propileno e etileno.

A característica típica de um copolímero de alta qualidade é a baixa proporção de moléculas de etileno. A proporção de etileno determina o ponto de fusão do copolímero, quanto maior é a proporção de etileno menor é o ponto de fusão, sendo assim o ponto de fusão do copolímero está dependendo da quantidade de etileno. Uma proporção demasiado elevada de etileno provoca um incremento da opacidade do filme.

2.2. Propriedades

2.2.1 Estereoregularidade ou taticidade

O polipropileno é um termoplástico semicristalino, produzido através da polimerização do monómero propeno, usando um catalizador estereoespecífico formando cadeias longas, As macromoléculas de polipropileno podem conter milhares de unidades monoméricas. O termo estereoespecífico do catalizador refere-se á característica de controlar a posição do grupo metil na cadeia polimérica de forma ordenada ^[7].

Dependendo da orientação espacial dos grupos metil, o polipropileno pode ser isotático, sindiotático ou atático.

No polipropileno isotático os grupos metil estão ordenados do mesmo lado da cadeia, no atático não apresentam uma ordem definida (ordem aleatoria) e no sindiotático apresenta uma ordem regular de alternância de sentidos opostos ^[9].

A figura 6 ilustra os diferentes tipos de polipropileno, de acordo com a taticidade. Os átomos de carbono são mostrados a vermelho (grandes) e os de hidrogénio em azul (pequenos) ^[10].

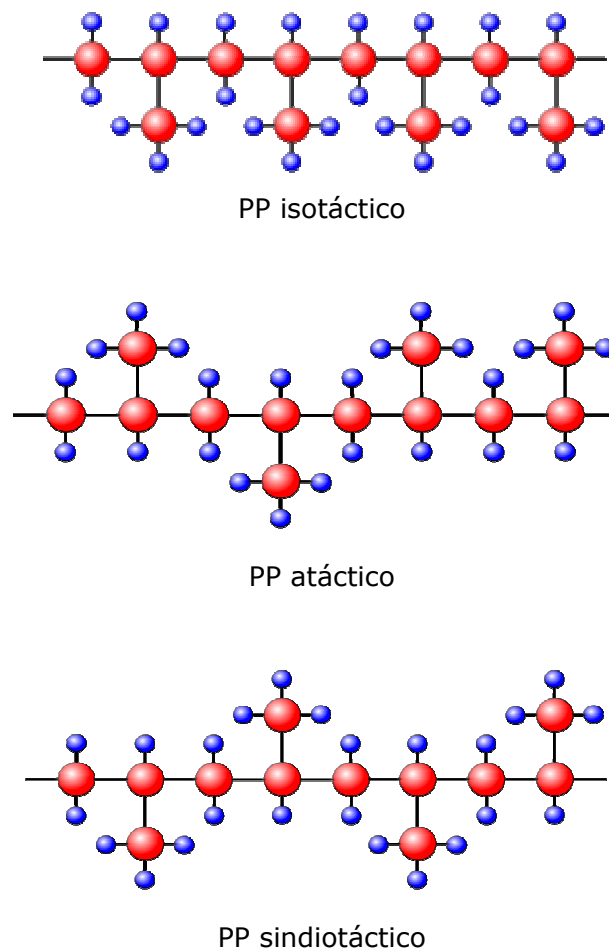


Figura 6: Configuração do polipropileno segundo a sua taticidade ^[10].

2.2.1.1. Polipropileno isotático

A estrutura regular do polipropileno reflecte-se na sua cristalização (termoplástico semi-cristalino). Isto significa que este polímero, em comparação com o PE-HD tem uma maior resistência mecânica e temperatura amolecimento e fusão superiores, mas uma menor densidade devido à abundância de grupos metilo secundários. O polipropileno isotático possui um maior número de aplicações industriais, utilizando geralmente uma mistura com uma pequena quantidade de polipropileno atático. Adicionalmente, as propriedades mecânicas e térmicas são melhoradas com a orientação ^[3].

Na tabela 1 podemos ver a variação das diferentes propriedades ao aumentar o nível de polipropileno atático ^[19].

Tabela 1: Variação das propriedades com o nível de ataticidade ^[19].

Propriedades	Ao aumentar a taticidade
Rigidez	Diminui
Módulos	Diminui
Resistência ao impacto da temperatura ambiente	Aumenta
Facilidade de ser estirado	Aumenta
Alongamento	Aumenta
Resistência ao envelhecimento térmico a longo prazo	Diminui
Temperatura de distorção térmica	Diminui
Resistência do termoselado	Aumenta
Turbidez do filme (haze)	Diminui
Bloqueio no filme	Aumenta
Tolerância á irradiação	Aumenta
Solubilidade	Aumenta

Propriedades ópticas	Aumenta
Temperatura de fusão	Diminui
Temperatura de cristalização	Diminui

2.2.1.2. Polipropileno atático

O polipropileno atático apresenta uma baixa cristalinidade, porque não tem qualquer ordem (termoplástico amorfo), portanto, a sua densidade e a sua resistência mecânica são menores e têm uma temperatura de amolecimento e fusão menor. À temperatura atmosférica é pegajoso e elástico como a borracha. É usado com grande quantidade de cargas minerais e em aplicações como electrotecnia, massas para marcar estradas, massa para insonorizar automóveis e como aditivo para betume, borracha, etc. [3].

2.2.1.3. Polipropileno sindiotático

Actualmente, está-se a obter polipropileno sindiotático utilizando catalisadores metallocene, espera-se que as aplicações deste tipo de polipropileno aumentem no futuro. O aparecimento de catalisadores metallocene está a permitir o surgimento de outras formas estereoquímica como polipropileno semi-isotático, onde a maioria dos grupos metil se encontram do mesmo lado da cadeia de polipropileno, como no isotático, mas outros grupos metilo são inseridos em intervalos regulares para o lado oposto da cadeia [3].

2.2.2. Polimorfismo do polipropileno isotático

É amplamente reconhecido o facto da existência de diversas formas morfológicas no polipropileno isotático, caracterizando-se como um composto com características polimórficas (tendência de um composto exibir mais de uma forma cristalina) [3].

2.2.2.1. Forma α do polipropileno isotático

As cadeias sob a forma de polipropileno isotático formam uma estrutura helicoidal numa célula unitária monoclinica, com as dimensões de 20,8 x 6,6 x 6,5 Å. Predomina o crescimento radial sob a forma de lamelas, que também podem

associar-se tangencialmente. Trata-se de uma estrutura cruzada, que se agrega para formar esferulites.

A forma do polipropileno isotático é a forma dominante do polipropileno obtido por normal de processamento ^[3].

2.2.2.2. Forma β do polipropileno isotático

Esta forma já é conhecida há muitos anos, mas não há um consenso sobre a sua forma cristalina. Diversas células unitárias têm sido propostas com base em diversos estudos. A formação da cristalinidade do tipo β resulta em uma estrutura de célula unitária com menor densidade (em relação ao tipo α), maiores taxas de cristalização com respeito à forma cristalina obtida sob condições apropriadas de aquecimento. Em resumo, a ordem associada ao seu estado cristalino é menor quando comparada a forma α ^[3].

2.2.2.3. Forma γ do polipropileno isotático

A presença desta fase cristalina é particularmente incomum em amostras de polipropileno fabricado com parâmetros operacionais tradicionais. Portanto, devido a este facto, é a forma cristalina menos estudada do polipropileno. A obtenção desta forma requer a utilização de homopolímero de baixo peso molecular oriundo de catálise homogénea e copolímeros aleatórios processados sob altas pressões ^[3].

2.3. Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas do polipropileno dependem fortemente da sua cristalinidade. Com o aumento da cristalinidade aumenta a rigidez, dureza, tensão de rotura e resistência à flexão mas diminui a resistência ao impacto ^[10].

2.4. Formulação e aditivos para a produção de filmes de BOPP

Durante a fabricação do filme de polipropileno bi-orientado, é necessário: homopolímero, copolímero e uma série de aditivos com o fim de lhe conferir as propriedades desejadas. Entre os diversos aditivos devem destacar-se os agentes nucleantes, antiestáticos, deslizantes, antibloqueio e pigmentos.

Os agentes nucleantes melhoram as características do filme tais como: a transparência e suas propriedades mecânicas. A adição de nucleantes origina um grande número de núcleos de cristalização, de maneira que as esferulites formadas

são mais pequenas e mais numerosas que no polipropileno não nucleado. É produzido com elevados níveis de cristalinidade, dando origem a uma maior resistência à tracção, maior rigidez, mas menor resistência ao impacto. Como o tamanho das esferulites é menor, a luz dispersa ao passar através do filme é menor, pelo que o filme obtido apresenta menor turbidez. Os agentes utilizados no polipropileno incluem sais de ácidos carboxílicos e sais de fosfato orgânico.

O polipropileno é um isolante. Como não conduz a electricidade, a carga eléctrica pode acumular-se sobre a superfície e causar problemas como a atracção de pó, aderências estáticas nos filmes, descargas eléctricas ou incêndios, etc. Para evitar estes fenómenos, os filmes BOPP utilizam agentes antiestáticos. Estes agentes podem ser iónicos ou não iónicos. Os iónicos incluem compostos catiónicos, como sais de amónio quaternário, sais sulfónicos, ou aniónicos, geralmente sulfonatos, fosfatos ou ácidos carboxílicos. Os antiestáticos não iónicos incluem ésteres como os ésteres de glicerol de ácidos gordos e aminas terciárias etoxiladas. Os antiestáticos não iónicos são os mais utilizados em filmes BOPP como o monoestearato de glicerol.

Os agentes deslizantes utilizam-se para promover uma lubrificação do filme que permite uma correcta utilização nas máquinas de embalagem. Apresentam uma compatibilidade limitada com o polímero, pelo que vêm à superfície, formando um "recubrimento" que reduz o coeficiente de fricção do filme. Os agentes deslizantes mais utilizados são geralmente os ésteres de ácidos gordos ou aminas gordas.

Os agentes antibloqueio previnem que o filme auto adira devido a um fluxo frio ou devido à geração de electricidade estática que se incorpora nas capas externas do filme. O tamanho de partículas do agente antibloqueio deve ser superior à espessura da capa, conseguindo assim que nunca haja contacto íntimo entre duas voltas de uma bobina o que poderia originar pontos de adesão.

As duas cores de uso praticamente exclusivo do filme BOPP são o branco e o perlado. Para a obtenção de um filme branco introduz-se na sua formulação TiO_2 como elemento de carga e coloração. Para a obtenção do filme perlado utiliza-se CaCO_3 . O filme BOPP admite a introdução de pigmentos na sua formulação, devendo ser escolhidos com cuidado, pois tem de resistir às temperaturas de extrusão e aos elevados estiramentos a que é submetido o filme durante o fabrico ^[19].

2.5. Efeito da orientação nas características dos filmes

O alinhamento das cadeias de polímero em materiais orientados facilita a formação de estruturas cristalinas, resultando no aumento da cristalinidade. A rigidez e a resistência aumentam no sentido da orientação e diminuem no sentido perpendicular ao estiramento. A resistência provém das ligações covalentes entre os átomos de

carbono da cadeia de polipropileno e a orientação incrementa o número de cadeias de polipropileno alinhadas no sentido do estiramento. Como resultado, uma menor quantidade de material pode suportar a mesma carga aplicada.

A permeabilidade do filme BOPP reduz drasticamente devido ao incremento da cristalinidade, uma vez que as moléculas não podem difundir-se facilmente através da matriz cristalina. O aumento da cristalinidade também aumenta a resistência dielétrica; os filmes bi-orientados podem suportar três vezes mais a tensão relativamente a um filme não orientado antes que tenha lugar a ruptura dielétrica.

As propriedades ópticas são melhores no filme bi-orientado. Nos filmes não orientados a refração da luz nas interfaces entre as regiões amorfas e cristalinas produzem turbidez (haze). Este efeito distribui-se em todas as direcções ^[19].

Na tabela 2 resumem-se os efeitos gerais da orientação no polipropileno.

Tabela 2: Efeitos da orientação no polipropileno ^[19].

Propriedades	Resultado da orientação
Resistência á tracção	Aumenta
Módulos de elasticidade	Aumenta
Resistência ao impacto de queda	Aumenta
Resistência ao impacto no frio	Aumenta
Permeabilidade	Diminui
Turbidez (haze)	Diminui
Brilho	Aumenta
Retracção	Aumenta

3. PRODUÇÃO DE FILMES BOPP

3.1. Tecnologias de produção existentes

Existem três tecnologias principais para a fabricação do filme de polipropileno bi-orientado:

- Processo de estiramento plano em duas fases
- Processo por sopro em dupla camada
- Processo por estiramento simultâneo ou bi-direcional

Existe também o processo de alongamento em três fases, mas a sua aplicação industrial é quase nula. Seguidamente será feita uma breve descrição de todos os processos, aprofundando mais a tecnologia do estiramento plano em duas fases por ser o mais utilizado.

3.1.1. Processo de estiramento simultâneo

O processo de estiramento bi-direccional é feito numa única etapa. Neste tipo de tecnologia o polipropileno extrudido para formação filme é similar ao processo de estiramento em duas fases, explicado mais à frente. Neste processo ao contrário do processo de estiramento em duas fases, o estiramento dá-se numa só etapa, o filme fixo por alguns grampos, que fará o estiramento longitudinal e transversal ao mesmo tempo. Este processo não é muito utilizado ^[15].

3.1.2. Processo por sopro em dupla camada

O processo por sopro em dupla camada é composto por uma extrusora principal (que é responsável pela camada interna, homopolímero de polipropileno) e coextrusoras (responsáveis pelas camadas externas).

O filme passa através de um túnel de sobreaquecimento (usando vapor) em que a temperatura chega a ser superior ao ponto amolecimento mas inferior ao ponto de fusão. Este tubo é aquecido por um jacto de ar pressurizado interno, que faz uma bolha, onde o filme é esticado em todas as direcções, ficando com um diâmetro de cerca de 6 vezes superior ao diâmetro original do tubo. O alongamento é axial e radial simultaneamente, por isso, as propriedades dos filmes são equilibradas em todos os sentidos. Existe uma região em que o filme é forçado a convergir até rolos, após os quais o filme é dividido em duas partes, cada uma delas conduzida até uma bobinadora. Anteriormente à bobinadora existe um medidor de espessura. Este

processo é mais utilizado que o anterior ^[15]. A figura 7 esquematiza o processo por sopro em dupla camada.

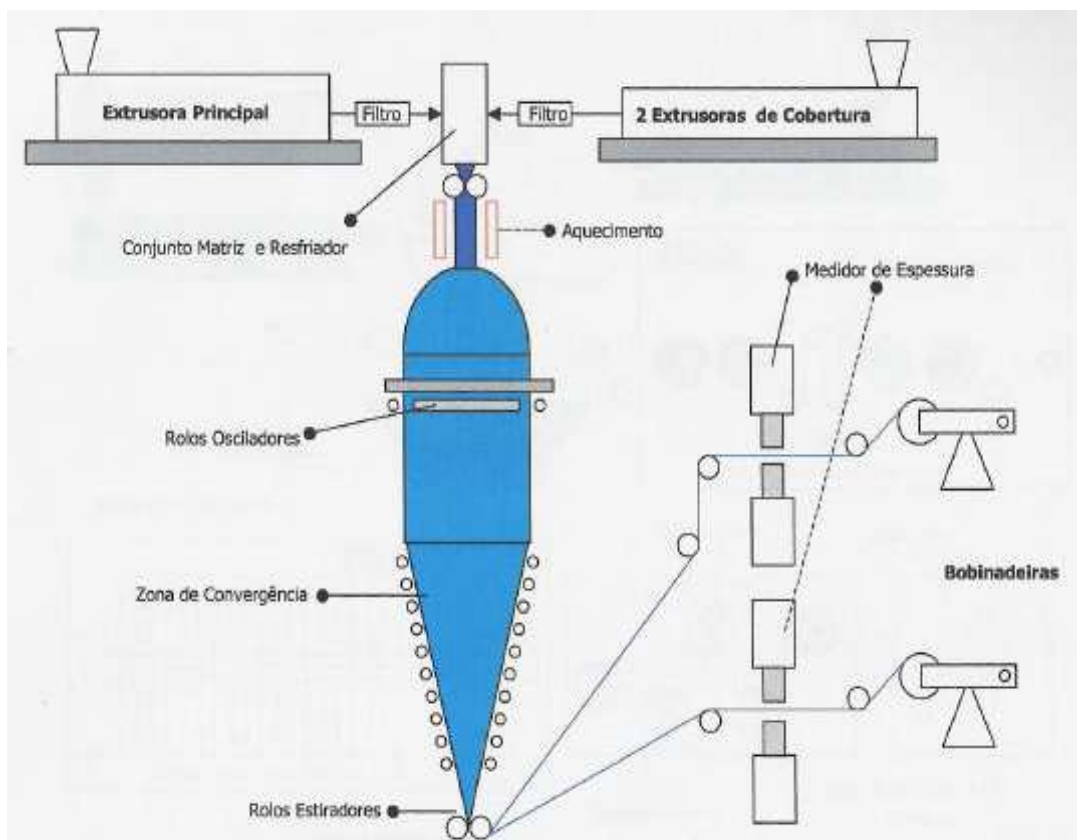


Figura 7: Esquema do processo tubular ^[15].

3.1.3. Processo de estiramento plano em duas fases

O processo de estiramento plano em duas fases, como o próprio nome indica, é feito em duas etapas. Como já foi mencionado anteriormente é o processo mais importante a nível industrial e é responsável por cerca de 90% da produção de polipropileno bi-orientado. A sua produção divide-se em diversas secções reflectindo a sua influência no produto final.

3.2. Descrição do processo existente na empresa

O processo existente na empresa é o processo de estiramento plano em duas fases. Este processo divide-se em várias secções ao longo da linha de produção:

- Zona de armazenamento de matérias – primas

- Zona de extrusão
- Zona de conformação e refrigeração do filme (*Chill - Roll*)
- Zona de estiramento longitudinal (MDO)
- Zona de estiramento transversal (TDO)
- Zona de acondicionamento (*Pull - Roll*)
- Zona de bobinagem final

Na figura 8 pode ver-se um esboço geral do processo focando as diferentes fases.

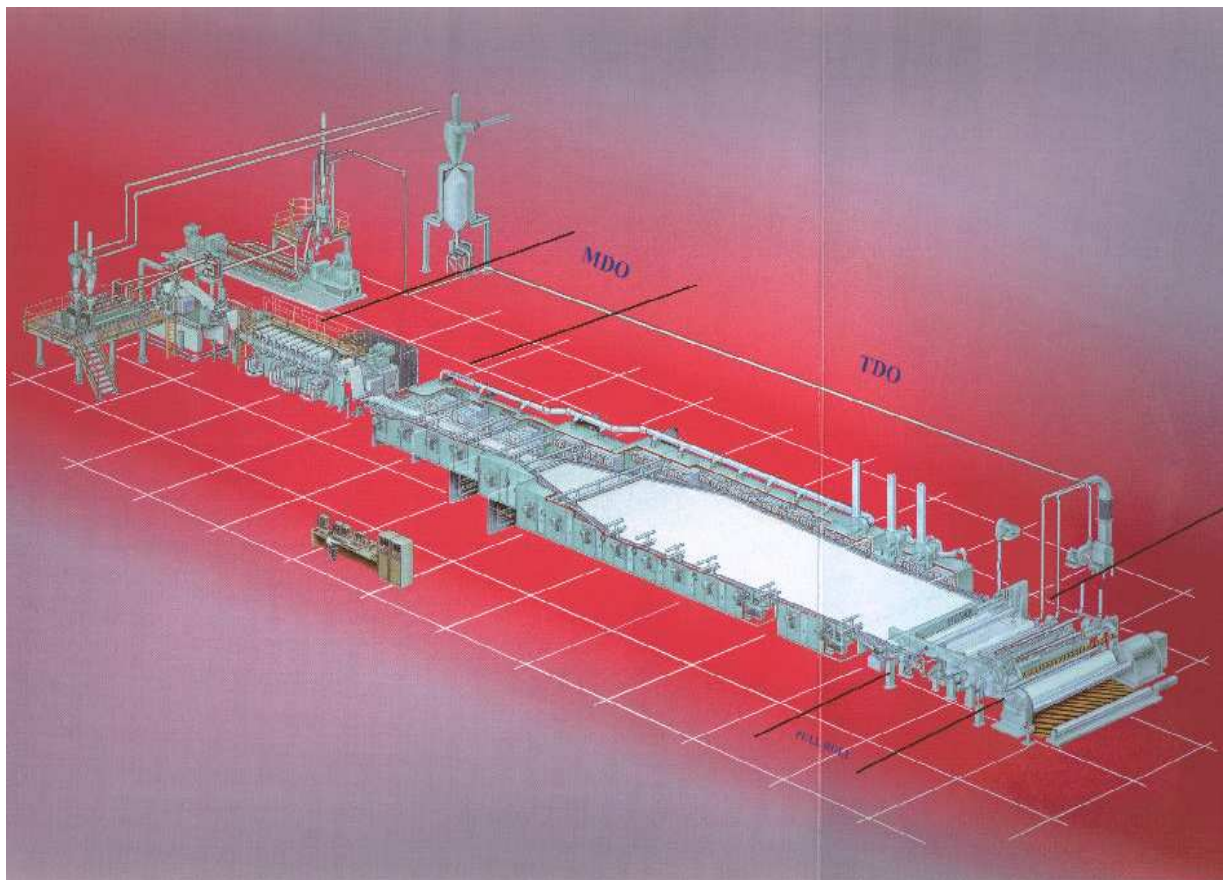


Figura 8: Esquema do processo estiramento plano em duas fases.

3.2.1. Zona de armazenamento de matérias – primas

No início de todo o processo situa-se na área de silagem, onde estão armazenadas as matérias – primas, que são a base de um bom filme. Uma modificação da condição padrão da matéria – prima pode ocasionar diversas falhas do filme que está em processamento, o que origina perda de eficiência, em casos extremos pode ser necessário parar a produção.

Para o armazenamento de diferentes homopolímeros e copolímeros é necessário um grande número de silos. Podem existir também silos menores para armazenamento de polipropileno reciclado resultante da reutilização do filme que não se adequou às necessidades dos clientes. Os aditivos são guardados num armazém, protegidos da humidade.

Cada matéria – prima é conduzida pneumáticamente para as unidades doseadoras, onde as quantidades exactas são enviadas para um misturador. Este equipamento misturador é dotado de uma rosca que alimenta continuamente a extrusora e um compactador (acessório que mantém o material compacto) evitando a formação de espaços vazios (ar) ^[15]. Na figura 9 pode-se ver o percurso que os diversos componentes seguem até chegar à extrusora principal.

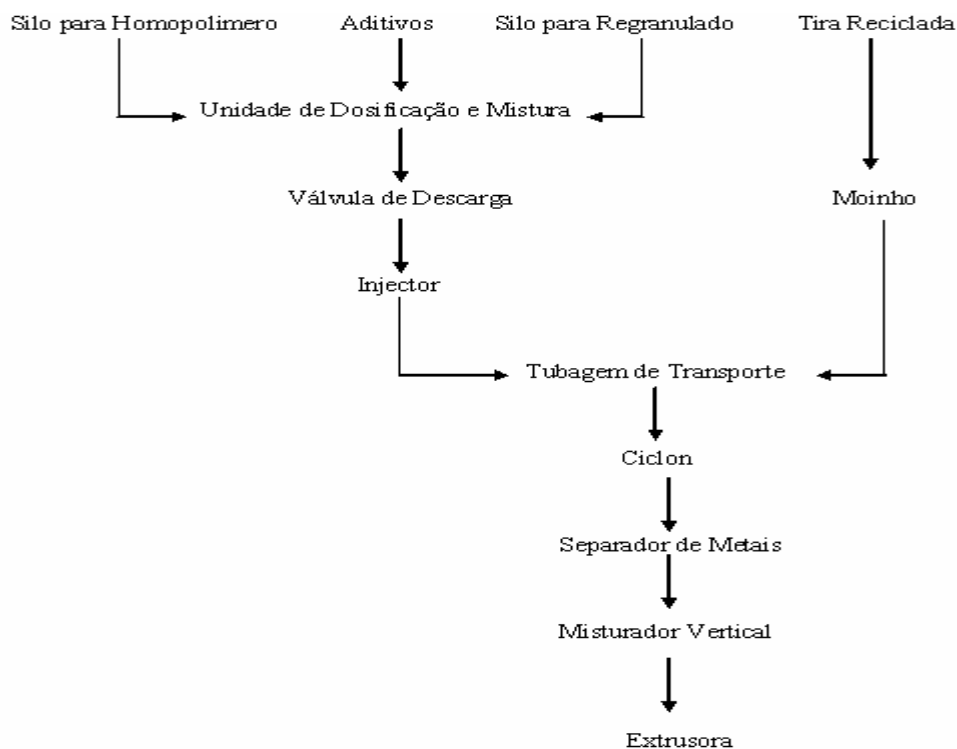


Figura 9: Esquema do percurso dos diversos componentes.

O sistema de mistura e dosagem é um dos pontos-chave para manter a qualidade do filme. O fluxo de descarga de cada componente pode ser ajustado através de um sistema de controlo contendo um contador pré – ajustável. Depois de se ter seleccionado a razão dos componentes de alimentação, o sistema reproduz automaticamente o caudal de descarga de cada componente mantendo as proporções adequadas que depois seguem para uma unidade de mistura de secção cónica.

As matérias – primas caem desde a partir da válvula de descarga no interior da zona de sucção do injector juntando-se com os fragmentos reciclados e são transportadas até ao ciclone situado por cima do extrusor principal.

Um detector indutivo separa as peças metálicas através de um breve encerramento da descarga e retirando essas peças para um saco. O parafuso misturador conduz a mistura dos materiais em sentido ascendente no interior do túnel. Uma parte da mistura cai dentro da zona de alimentação do extrusor principal e o resto volta ao misturador.

O sistema de alimentação das coextrusoras é equipada de uma unidade de dosagem e mistura, com controlo de nível, para o copolímero e os aditivos.

3.2.2. Zona de extrusão

Na unidade de extrusão fundem-se as matérias – primas, que são plastificadas pelos extrusores, filtradas e laminadas. O extrusor principal está projectado para proporcionar os requisitos de um fundido homogéneo, especialmente para matérias-primas de distintas densidades. A linha BOPP está equipada com duas unidades de extrusão:

- Unidade principal de extrusão
- Unidade de coextrusão

A extrusora principal vai dar origem à camada central do filme, formada por homopolímero de polipropileno, aditivos e polipropileno reciclado. Os coextrusores darão origem às capas exteriores. Na figura 8 pode-se ver o esquema de uma extrusora utilizada na fabricação de filme BOPP. Nesta extrusora podem identificar-se três zonas:

- **Zona de alimentação:** nesta secção ocorre o transporte dos grãos para a zona de compressão, e em alguns casos, o início da plastificação do material. Compreende aproximadamente 1/3 do comprimento total da rosca, variando esta medida segundo o fabricante do equipamento e o material processado. Esta região encontra-se próxima à abertura de carga e tem os canais mais profundos em relação às demais secções. Em alguns casos esta secção de alimentação está equipada com uma rosca dotada com um sistema interno de arrefecimento. Os canais são perfurados paralelos ao eixo da mesma, permitindo a circulação de água para arrefecimento. A função do sistema é manter a rosca fria para que o transporte de sólidos seja mais eficiente. Em geral, quanto maior for o

comprimento desta região maior é a capacidade produtiva da máquina. A geometria do passo do parafuso (largura e inclinação) também tem influência sobre a produtividade da máquina.

- **Zona de compressão:** é a secção onde ocorre a compressão e plastificação final do material. A profundidade dos canais é, na maioria dos casos, reduzida linearmente, desde a profundidade da zona de alimentação até à zona de dosagem, causando um aumento de pressão no material que está no canal. Assim, através do atrito gerado por fricção nas paredes do cilindro (aumentado pela pressão resultante da diminuição da secção) e do aquecimento das resistências externas, o material é plastificado. O comprimento desta zona é de aproximadamente $\frac{1}{4}$ do comprimento total.
- **Zona de dosagem:** Devido ao movimento em espiral do material dentro do canal da rosca, o mesmo é misturado, homogeneizando e os aditivos misturados na massa polimérica. Por isso, esta secção também pode ser chamada de secção de homogeneização. O fluxo do material já plastificado torna-se mais uniforme, pois este sai em estado turbulento da zona anterior devido à compressão. Desta forma, o fluxo chega ao final da extrusora mais uniforme, sendo distribuído igualmente no cabeçote. Na figura 10, pode-se ver o esquema de uma extrusora.

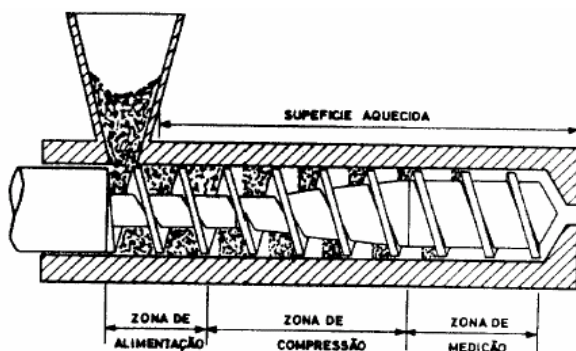


Figura 10: Esquema de uma extrusora [14].

Neste tipo de extrusores, as temperaturas oscilam entre 230 e 2290°C, temperaturas demasiado elevadas que aumentam a fluidez da massa fundida.

Tanto a extrusora como as coextrusoras estão ligadas através de adaptadores à laminadora. A cabeça da laminadora está desenhada para conduzir o fundido desde os extrusores para os orifícios de entrada das três folhas da laminadora. Cada folha tem a sua própria laminadora interna com uma fórmula calculada para compensar a queda de pressão, garantindo um fluxo de fundido uniforme em toda a extensão da

lâmina. O ajuste do perfil do fundido pode realizar-se através dos pernos do lábio flexível da laminadora, podendo-se ajustar de forma manual ou de modo automático, através do sistema de auto controlo do perfil ^[15]. A figura 11 mostra a boca de uma laminadora para filme plano (lado esquerdo) e para filmes de três camadas (lado direito).

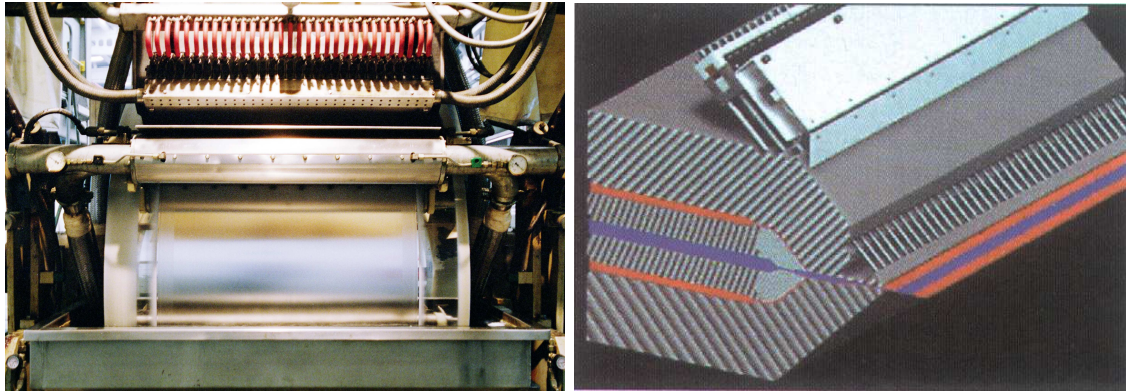


Figura 11: Boca da laminadora para filme plano e filme de três camadas ^[14].

3.2.3. Zona de conformação e refrigeração do filme (*chill roll*)

Esta unidade retira o filme da laminadora solidifica-o por arrefecimento. Para este processo é necessário um rolo (rodilho) de refrigeração de grandes dimensões chamado *chill roll*, podendo ver-se o esquema na figura 12.

A correcta adesão ao *chill roll* é garantida por dispositivos colocados próximos do lábio da laminadora, denominados por facas de ar, que sopram forçando o filme na direcção da superfície do rolo. Os bordos laterais do filme são estabilizados contra o rolo por bicos de ar, que actuam de maneira semelhante á faca de ar. O filme aderido ao rolo é conduzido (através da rotação do rolo) até um tanque com água a temperatura controlada. O filme, nesta fase denominado por *cast*, deixa o *chill roll* e passa através de um sistema de arrefecimento e remoção de água, que se baseia em rolos de borracha e jactos de ar. Finalmente o filme está apto para seguir para a próxima zona do equipamento ^[15].

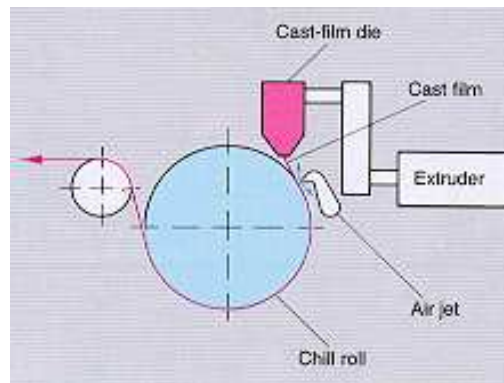


Figura 12: Esquema do *chill roll* [14].

3.2.4. Zona de estiramento longitudinal (MDO)

Esta zona é denominada por MDO (*Machine Direction Orienter*) e realiza o estiramento longitudinal do filme. Basicamente é constituída por diversos rolos tal como representado na figura 13.

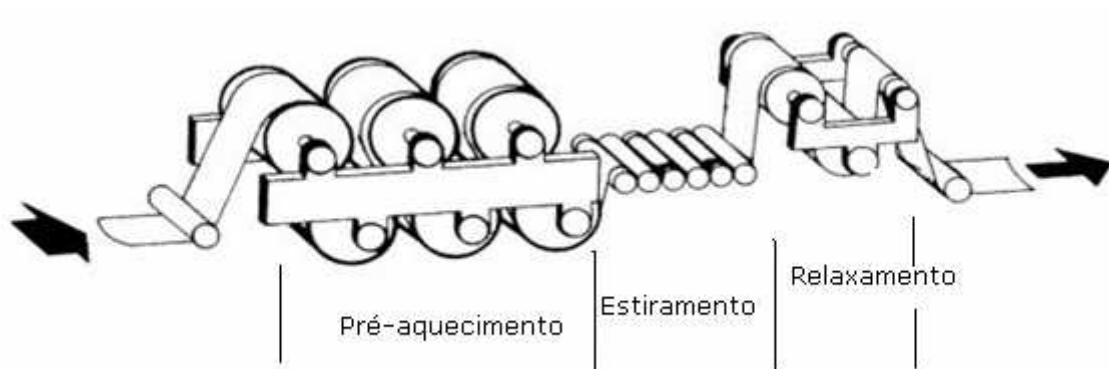


Figura 13: Esquema do MDO [14].

Existem diversas classes de rolos:

- **Rolos de pré-aquecimento:** rolos de grande diâmetro onde o filme é aquecido lentamente até próximo da sua temperatura de estiramento. A velocidade dos rolos é aproximadamente igual e constante. Apenas se fazem pequenas variações com a finalidade de compensação da expansão do filme.
- **Rolos de Estiramento:** rolos de menor diâmetro com velocidades diferenciadas em relação aos rolos de pré-aquecimento e entre si, o que ocasiona o estiramento longitudinal.

- **Rolos de Relaxamento:** rolos que possuem a função de fixar as novas dimensões finais do filme e de minimizar tensões geradas durante o estiramento.

O filme entra no MDO sendo orientado por rodilhos de pré-aquecimento que são aquecidos por meio de óleo térmico. A temperatura fixa-se para cada par de rodilhos de pré-aquecimento, num total de 9 pares (18 rodilhos), portanto existem 9 controladores de temperatura. Os primeiros seis rodilhos têm uma superfície cromada, os últimos são revestidos a teflon, o revestimento de teflon é necessário para cumprir o programa de temperaturas utilizado na produção do filme co-extrudido. Com este revestimento, podem aplicar-se temperaturas superiores sem que existam fenómenos de aderência.

A secção de estiramento consta de seis rodilhos, os primeiros dois rodilhos actuam como rodilhos de arrefecimento sendo o estiramento longitudinal propriamente dito realizado entre o segundo e o terceiro par de rodilhos. A esta zona chama-se intervalo de estiramento. Após o estiramento longitudinal, o filme passa entre os rodilhos de relaxamento que são quatro e permitem a fixação térmica.

Na zona de MDO procura-se trabalhar com temperaturas baixas a fim de minimizar a liberação de aditivos que venham sujar os rolos e prejudicar a qualidade do final filme. Entretanto, se a vazão da linha aumentar, há a necessidade de aumentar o perfil de temperaturas a fim de garantir o efeito desejado no filme (quanto maior é a vazão da linha, menor é o tempo de residência do filme em cada rolo, o que origina a necessidade de temperaturas superiores para garantir a mesma permuta térmica).

Para manter sempre constante a tensão do filme entre o *chill roll* e o MDO existe uns rodilhos bailadores à entrada do MDO. Estes rodilhos são instalados com a finalidade de controlar a velocidade ^[15]. Na figura 14 pode ver-se o filme a sair do MDO para entrar na secção seguinte (TDO).

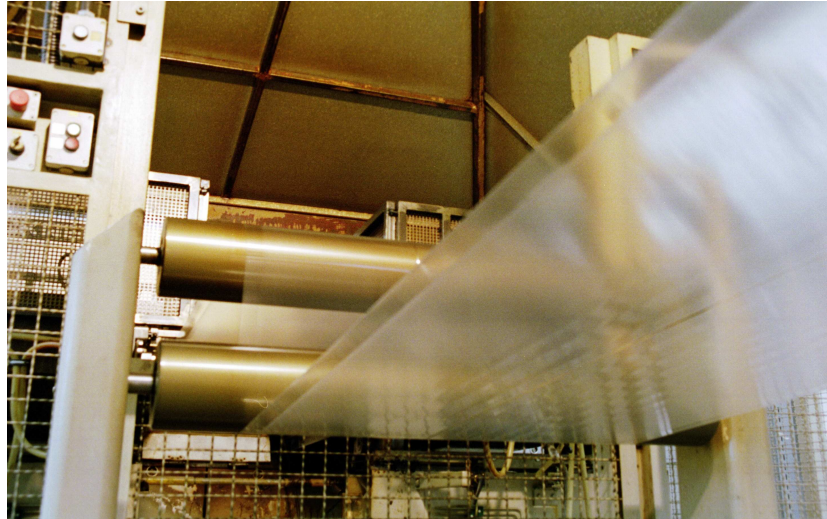


Figura 14: O filme á saída do MDO ^[14].

3.2.5. Zona de estiramento transversal (TDO)

A máquina de orientação na direcção transversal TDO (*Transverse Direction Orienter*) estira transversalmente filme orientado longitudinalmente no MDO. O TDO está dividido em quatro zonas, como demonstra a figura 15:

- Zona de pré-aquecimento
- Zona de estiramento
- Zona de fixação
- Zona de arrefecimento

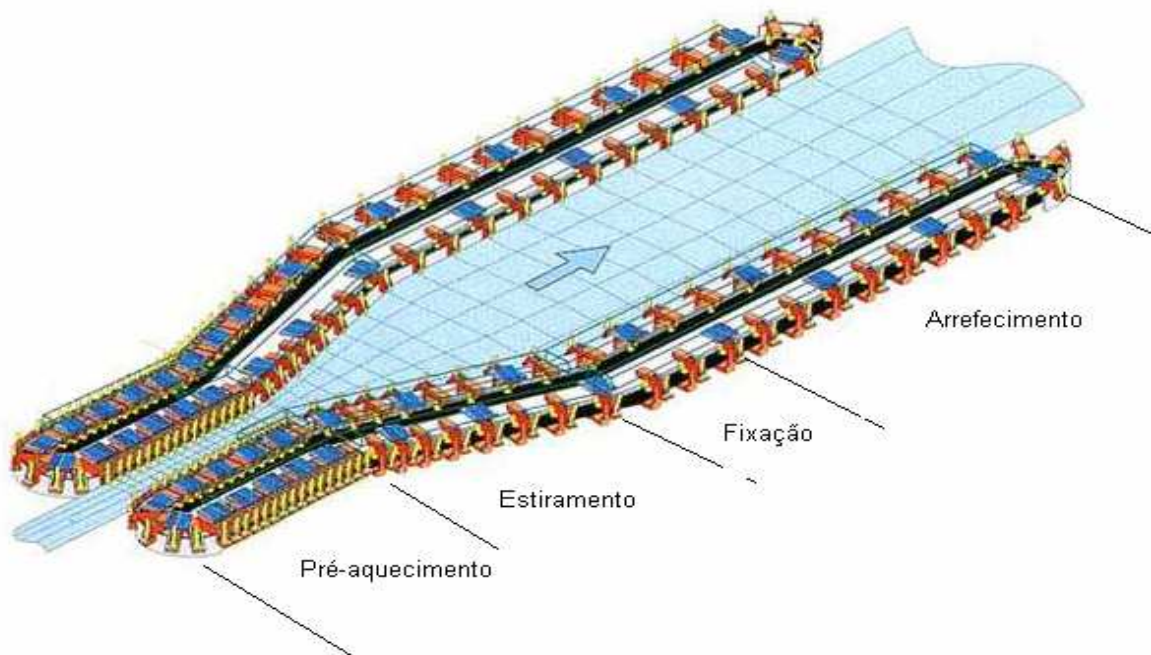


Figura 15: Esquema do TDO ^[14].

O filme é conduzido através do TDO por um sistema de grampos instalado sobre uma correia de tracção que desliza num carril. A posição do carril pode ajustar-se através de volantes accionados manualmente e situados entre diferentes zonas. Os grampos estão desenhados para segurar firmemente as bordas do filme e conduzi-lo às distintas zonas do TDO.

O aquecimento e o arrefecimento do filme realizam-se por meio de correntes de ar estando a secção TDO dividida em duas zonas (aquecimento e o arrefecimento). Estas correntes distribuem-se uniformemente por meio de tubagens de secção quadrada. Por cima de cada zona existe uma abertura para retirar os vapores que são gerados pelos aditivos. A não deste sistema de extracção pode provocar a condensação dos aditivos e consequente gotejar provocando manchas e roturas.

Na zona de pré-aquecimento, a temperatura aumenta e os carris mantêm-se paralelos. Nesta zona o filme deve apenas ser transportado e não estirado.

Na secção de estiramento a distancia entre os carris aumenta progressivamente estirando o filme na direcção transversal.

Na zona de fixação, o sistema de tracção converge ligeiramente para estabilizar as dimensões do filme mediante relaxação da temperatura.

A última zona do TDO é a zona de arrefecimento. Nesta zona o ar, que esta à temperatura ambiente, é soprado sobre o filme arrefecendo-o. Depois do arrefecimento, os grampos libertam o filme que é arrastado para a unidade de *pull-roll*.

Como as bordas do filme estão presas pelos grampos, estas permanecem sem estirar, permanecendo mais espessos e sendo necessário corta-los á saída do TDO. Para evitar a produção de resíduos, as tiras das bordas são trituradas num moinho e recicladas para o extrusor principal, este é um processo contínuo durante toda a produção ^[15]. Na figura 16 pode ver-se o estiramento na secção de TDO e a passagem da fase de aquecimento para a fase de arrefecimento.



Figura 16: Estiro no TDO ^[14].

3.2.6. Zona de acondicionamento (*Pull - Roll*)

Depois de todo o processo exposto, o filme é submetido a uma série de operações das quais resultará o produto final. Todo ele se realiza na zona denominada "*Pull - Roll*". Nesta unidade estão instalados o medidor de espessura do filme produzido, o sistema de corte das bordas e a estação de tratamento corona e chama ^[15]. A figura 17 esquematiza a zona de *Pul-Roll*.

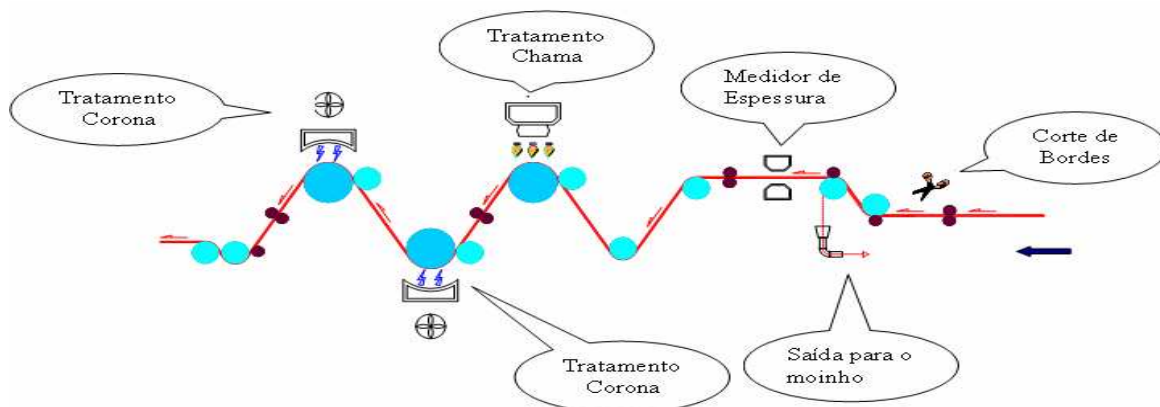


Figura 17: Esquema geral do *Pull-Roll* ^[12].

3.2.6.1. Controlo de espessura

Um dispositivo capaz de locomover-se transversalmente ao deslocamento do filme é responsável pela medida do perfil de espessura do filme, que é verificado continuamente através da utilização de raios gama ou X, isto é, conforme a absorção desta radiação através da passagem pelo filme, o detector apresenta uma espessura relativa a esta leitura. O controlo efectivo da espessura pode ser feito via controlador

ligado ao próprio painel de controlo central, quando a variação da espessura for pequena e o ajuste a ser realizado fino, ou pode exigir a intervenção do operador da sala de controlo central quando as correcções de espessura requeridas forem superiores. O operador pode actuar individualmente em cada parafuso, ajustando cada região conforme a necessidade verificada no perfil médio ou no perfil medido em tempo real ^[15].

3.2.6.2. Corte das bordas do filme

Nesta secção o filme já bi-orientado é puxado do TDO e as suas bordas (denominadas de aparas) removidos por meio de laminas fixas (facas) e conduzidas até um moinho, que garante a sua reciclagem (*fluff* - filme triturado) posteriormente utilizado na alimentação (figura 18). O deslocamento correcto do filme é garantido por diversos rolos de borracha, semelhantes aos utilizados no MDO mas de menor comprimento, e por extensores.

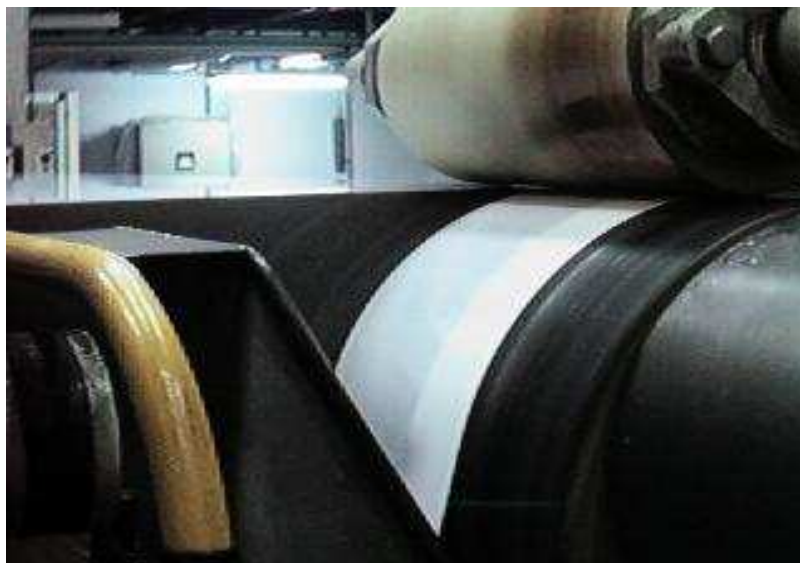


Figura 18: Corte das bordas dos filmes ^[12].

3.2.6.3. Sistema de tratamento superficial

A maioria dos plásticos é quimicamente inerte, tem uma superfície não-porosa e possui um nível de tensão muito baixa. Como resultado, as tintas de imprensa, substratos, revestimentos e adesivos apresentam pouca aderência a estes substratos. Os que possuem menor tensão superficial são o oietileno e o polipropileno, sendo necessário proceder ao tratamento de superfície para melhorar a adesão. O tratamento pode ser de dois tipos: Chama e Corona ^[15].

3.2.6.3.1. Tratamento corona

O tratamento corona consiste no uso de uma descarga de alta voltagem cujo potencial, excedendo o ponto de ruptura de isolamento do ar que é da ordem de 26KV/cm, produz ozono e óxidos de nitrogénio, os quais oxidam a superfície do filme plástico.

Uma estação de tratamento típica é composta por, podendo-se ver na figura 19:

- Um eléctrodo ao qual é aplicada a alta voltagem;
- Um espaço entre o eléctrodo e o dieléctrico (gap de ar), o qual será ionizado criando o efeito corona e gerando o ozono;
- O material dieléctrico, o qual pode suportar altos níveis de voltagem sem romper-se;
- Um plano aterrado, normalmente um cilindro de alumínio sobre o qual é passado o filme.

Pode-se tratar também materiais laminados e outros materiais plásticos, papel e até substratos metálicos, como o alumínio. No tratamento de substratos metálicos utiliza-se um tipo diferente de estação, a qual tem o material dieléctrico aplicado ao eléctrodo de descarga, e não ao cilindro de tratamento. ^[12]

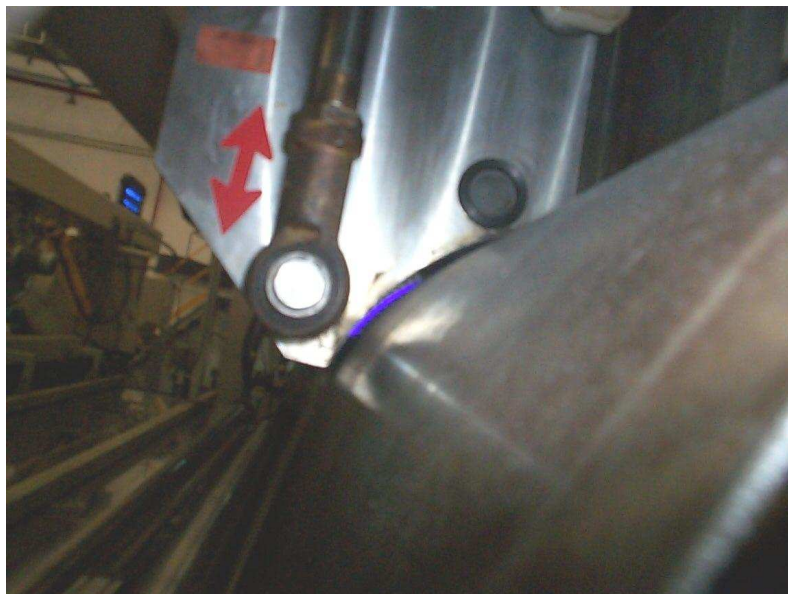


Figura 19: Tratamento corona ^[12].

Esta classe de tratamento é de natureza mais branda e seu efeito pode ser perdido em um período menor; entretanto, a alteração do padrão visual é menos sentida se comparada ao efeito do tratamento Chama.

3.2.6.3.2. Tratamento chama

O tratamento Chama, conforme a própria denominação indica, modifica a superfície do filme através da exposição à chama criada por queimadores, podendo ver-se na figura 20.

A chama a gás é a queima entre um combustível e um oxidante. Esta combustão produz uma reacção exotérmica complexa durante a qual as moléculas de oxigénio são dissociadas em átomos de oxigénio livre para bombardear a superfície do material.

O sistema consiste de um "isqueiro" que abrange a largura do filme, uma mistura de gases e a unidade controlo do espaço entre o queimador e o filme para garantir que a superfície da chama em contacto com o filme é aquela que corresponde à porção oxidante.

Este tipo de tratamento é bastante intenso e resiste durante mais tempo se comparado à outra classe de tratamento; entretanto, pode marcar certos tipos de filme, afectando seu padrão visual^[15].



Figura 20: Tratamento chama^[14].

3.2.6.4 Zona de bobinagem final

Esta zona consiste num bobinador tipo revolver de duas posições com unidade de corte automático. Com este bobinador pode-se combinar a troca dos rolos sem

interromper o processo de produção. Enquanto prossegue o processo de bobinagem numa das bobinas, a outra bobina pode ser retirada e substituído por um novo rolo. [15] A figura 21 mostra a bobinagem do filme final.



Figura 21: Esquema da bobinagem de uma bobina [14].

3.2.7. Armazenamento e corte

Quando a bobina possui a extensão desejada, ela é removida do *spooler* e transportada para um armazém com condições de temperatura controladas para recuperação. Durante este tempo, o filme estabiliza as suas tensões e relaxa podendo ocorrer a sua contracção imediata. Por outro lado, os aditivos incorporados na formulação que passaram por um processo de migração podem surgir homogeneamente distribuídos na superfície da película e originar um filme com a qualidade desejada.

Uma bobina de 8 metros não é adequada para transportar o filme, sendo necessário nesta fase o seu corte. Isto é feito através da combinação diferentes comprimentos e larguras de acordo com solicitações dos clientes, tentando minimizar o resíduo obtido [15]. A figura 22 mostra o corte de uma bobina e o enrolamento em bobinas mais pequenas que irão para o consumidor.



Figura 22: Esquema do corte de uma bobina^[13].

3.2.8. Reciclagem

Todos os cortes de bordas, restos ou filme não aceite pelo controlo de qualidade parâmetros fixados são enviados para reciclagem, onde será submetido a um processo de trituração resultando um granulado que vai ser incorporado de novo no fabrico do filme^[15].

3.3. Formas de apresentação dos filmes BOPP

Os filmes mais comuns são os transparentes, mas também existem no mercado filmes BOPP brancos, perlados, mates (estes últimos com um crescimento significativo de utilização); e em menor quantidade os pigmentado de várias cores.

Os filmes transparentes são:

- **Filme padrão de BOPP**

Este filme é habitualmente fabricado com espessuras de 12 a 50 microns não podendo ser selado pela acção do calor. Apresenta como característica mais destacável propriedades ópticas atractivas como um alto brilho e uma turbidez muito baixa. O seu principal uso é: cones para flores, em artes gráficas, etc.

- **Filme plano para fitas adesivas**

Como o próprio nome sugere, este filme tem sido desenvolvido para produzir fitas adesivas, sendo dotado de uma alta rigidez e umas propriedades mecânicas diferentes do filme padrão e um elevado teor de agentes antiestáticos, devido ao posterior processo que sofrerá o filme

- **Filme padrão co-extrudido**

É o filme BOPP mais usado em aplicações de embalagens de géneros alimentícios e alimentos. A espessura do filme oscila entre 20 e 50 microns.

- **Filme co-extrudido de baixa espessura**

Inclui os filmes com espessura inferior 20 microns, encontrando-se no mercado filmes desde 10 microns. Devido às novas leis de embalagens e resíduos de embalagens, a utilização deste tipo filme sofreu um aumento significativo e espera-se que o seu crescimento seja cada vez maior, já que na confecção de recipientes é desejável utilizar um menor peso de plástico para um mesmo volume, reduzindo, assim, as quantidades de plástico colocado em circulação.

- **Filmes que selam a baixas temperaturas**

A velocidade das máquinas de embalagem está a crescer, aumentando o seu rendimento. Contudo, esta exige o desenvolvimento de novos filmes com temperaturas com um início de termoselagem inferior ao do filme padrão e um melhor deslizamento. Para esse efeito, utilizam-se terpolímeros especiais que permitem obter uma temperatura inicial de termoselagem cerca de 25 °C inferior à dos copolímeros padrão

- **Filme retráctil**

Representam uma percentagem muito pequena dos filmes BOPP. Trata-se de filmes de baixa retracção. Eles são particularmente adequados para ser utilizado em embalagens de forma regular. No seu desenvolvimento joga-se com o factor de estabilização térmica não eliminando as tensões internas.

Dentro do grupo genérico dos filmes pigmentados destaca-se, pelo seu volume de utilização, os filmes brancos e perlados:

- **Filmes brancos**

Frequentemente utilizados estes filmes co-extrudidos, com um nível de opacidade de 50 a 60%, conseguem proteger o produto da luz.

- **Filmes perlados**

Dentro deste grupo distingue-se dois tipos: os filmes puramente perlados ou nacarados e os filmes perlados opacos, que se diferenciam pela sua opacidade e densidade.

- Filmes perlados ou nacarados: estes filmes obtêm-se introduzindo na formulação carbonato de cálcio:



Produz-se assim um efeito duplo; por um lado o CaO confere o aspecto pérola e por outro lado o CO₂ deixa no interior dos filmes "occos" que diminuem a densidade e ao mesmo tempo aumentam o seu rendimento e reduzem a sua resistência à tracção.

- Filmes perlados opacos: este filme pode definir-se como um intermédio entre os filmes brancos e os filmes perlados. Apresentam um tom branco brilhante e uma elevada opacidade.

Finalmente, pode obter-se um efeito de superfície mate (**Filmes mate**) com a utilização de um ter-polímero especial. A sua principal aplicação centra-se em duas áreas: enrolado para produzir o efeito de papel e nas janelas dos envelopes.

3.4. Controlo de qualidade e metodologias de caracterização

O filme BOPP deve obedecer a alguns requisitos, tanto ao nível das diferentes matérias – primas utilizadas como ao nível do controlo do produto final. Para isso, o controlo da qualidade não pode limitar-se a uma mera inspecção, sendo necessário ir mais além, determinando problemas durante a produção e no produto final.

3.4.1. Controlo das matérias – primas

Como já foi referido, o homopolímero de polipropileno representa cerca de 90 % da construção do filme, sendo necessário dar-lhe um maior relevo no que respeita ao controlo. É necessário ter em conta certos parâmetros como o índice de fluidez e o teor de humidade presente na matéria – prima.

O índice de fluidez pode ser determinada com um medidor específico mas normalmente ao nível industrial opta-se por utilizar o valor indicado pelo fornecedor.

O teor de humidade do homopolímero é determinado pesando uma quantidade exacta de homopolímero que se introduz na estufa a uma temperatura entre 100 °C e 130 °C durante um período determinado de tempo. Deve assegurar-se que as perdas serão de humidade e não por volatilização de nenhum componente. Após o seu arrefecimento volta-se a pesar a amostra e calcula-se o teor de humidade. Se o valor determinado for superior a 0,04% a produção do filme apresentará defeitos indesejáveis.

3.4.2. Controlo do processo

Durante o processo é necessário controlar os seguintes parâmetros chave:

- **Controlo da dosagem correcta das diferentes matérias – primas.** Para isso são realizados cálculos do consumo real de cada matéria – prima com respeito ao consumo teórico resultante da formulação pretendida.
- **Controlo da espessura.** Para o seu controlo é necessário um medidor contínuo de radiação beta ou de raios X que permitem conhecer, a todo o momento, tanto o valor médio de espessura como o perfil para a largura da lâmina.

3.4.3. Controlo do produto final

O filme BOPP é um produto que exige um alto nível de qualidade, sendo necessária uma inspecção e uma análise do produto de maneira contínua e rigorosa. Este controlo apresenta duas vertentes claramente diferenciadas mas intimamente ligadas:

- **Determinação dos defeitos originados na fabricação.** Neste ponto é muito importante a rapidez na detecção dos defeitos e a sua natureza, porque enquanto não for detectado o problema é produzido filme que vai ser rejeitado.
- **Comprovar que as propriedades do filme correspondem às especificações técnicas exigidas.** Os principais ensaios realizados ao produto final são: controlo de espessura, transmissão de luz e turbidez (HAZE), brilho especular, retracção, nível de tratamento, propriedades mecânicas, resistência à selagem térmica e coeficiente de fricção.

O controlo do produto deve então considerar as seguintes propriedades:

Controlo de espessura

A espessura do filme é muito importante, pois define a sua qualidade quanto a certos parâmetros, como por exemplo, a uniformidade da superfície que pode conduzir a um processo de impressão ou laminação totalmente inaceitável e implicar a rejeição do filme. É necessário medir a espessura a todas as bobinas e para tal utiliza-se um micrómetro. O instrumento consiste de uma sonda com uma

mola de constante elástica determinada para evitar a utilização de uma força excessiva sobre o filme resultando em leituras erradas.

Transmissão de luz e turbidez (HAZE)

A transmitância define-se como a relação entre os feixes de luz transmitida e incidente. É expresso em percentagem de luz transmitida, normalmente denomina-se por transparência.

A turbidez é a percentagem de luz transmitida que, ao passar através da amostra, se desvia do raio incidente por difusão directa.

De acordo com as definições anteriores, uma baixa turbidez indica baixa dispersão de luz ou seja, um material com boa homogeneização e baixa presença de impurezas microscópicas. Portanto, quanto menor for o valor da turbidez melhores características apresentará o filme. Para a sua medição utiliza-se um espectrofotómetro desenhado especialmente para esse fim e denominado turbidímetro.

Brilho especular

Define-se brilho especular como a fracção da reflectância luminosa relativa de uma amostra na direcção especular. Como diz a definição, é uma medida relativa, por conseguinte, a primeira coisa que se tem de fazer é um padrão de referência. Este padrão corresponde a atribuir o valor de 100 para um vidro preto altamente polido e relativizar as medidas de brilho especular relativamente a esta referência. Como se pretende obter a medida na direcção especular, deve definir-se o ângulo nesse sentido. Existem 3 ângulos base de incidência utilizados para medir o brilho especular plástico: 20 °, 45 ° e 60 °. Conforme aumenta o ângulo de incidência obtêm-se valores de brilho diferentes, por essa razão deve mencionar-se o ângulo utilizado. Por acordo entre os produtores europeus de filme BOPP, na sua análise convencionou-se utilizar um ângulo de incidência de 45°.

O medidor de brilho é basicamente formado por uma fonte de luz incandescente, uma lente condensadora e um conjunto de espelhos que geram uma fonte de luz CIE classe C. O raio de luz, criado por este grupo, é dirigido directamente na direcção da amostra. Uma célula fotoeléctrica recolhe luz reflectida e gera um sinal eléctrico que é convertida numa medida digital.

Retracção

A retracção é a mudança de comprimento de uma amostra sob a influência do calor, em certas condições de temperatura e tempo (130 ° C durante 5 minutos).

Esta medida é importante para aplicações BOPP que possuam uma baixa retracção.

O filme BOPP não apresenta as mesmas propriedades nos dois sentidos de estiramento, uma vez que estas não são iguais, por isso, algumas propriedades são assimétricas e devem ser determinadas em ambos os sentidos do estiramento: sentido longitudinal (MD) da máquina e de direcção transversal (TD).

Nível de tratamento

A capacidade do filme de polipropileno em reter tintas, revestimentos, adesivos, etc. depende fortemente do carácter da sua superfície e pode ser melhorada por alguma das técnicas de tratamento superficial. Estas técnicas de tratamento foram criadas para aumentar a tensão superficial da superfície dos filmes de polipropileno. É possível relacionar a tensão superficial dos filmes com a sua capacidade para aceitar e reter tintas, adesivos, revestimentos, etc.

Esta propriedade é crítica em termos dos parâmetros de qualidade do filme BOPP e deve ser controlada rigorosamente. Na sua medida é utilizado um método de ensaio que utiliza uma variedade de tintas com diferente tensão superficial através de misturas de diferentes quantidades de formamida e etílico Cellosolve (Etilenglicol com éter monoetílico) com uma pequena quantidade de corante (azul de metileno) para facilitar a visão da tinta. Para verificar o nível de tratamento do filme é aplicada uma pequena quantidade de tinta com a ajuda de um "cotonete" que se estende ao longo do filme numa camada uniforme. Se a tinta aplicada permanece um fluido contínuo, pelo durante 2 segundos e sem ruptura em gotas deve fazer-se o teste com tinta a tensão superficial superior e assim sucessivamente. Quando o fluido de tinta romper encontrou-se o valor da tensão superficial do filme.

Propriedades mecânicas

Dentro das propriedades dos plásticos as mais importantes de medir relacionam-se com as condições de utilização nas suas aplicações finais. Por exemplo, para aplicações como o envolvimento dos maços de cigarros ou rótulos de garrafas exige-se uma elevada rigidez.

No filme BOPP são determinadas principalmente 3 propriedades mecânicas:

- Resistência á tensão rotura.
- Deformação de rotura

- Módulo de elasticidade.

Mais uma vez, estas propriedades dependem fortemente da direcção do ensaio devido às diferentes condições de estiramento, razão pela qual devem ser determinado em ambos os sentidos.

Resistência de selagem

A quantidade de calor a utilizar no filme para melhor desempenho das máquinas embalagem deve ser determinado e otimizado. Assim, este ensaio é importante para a determinar a resistência.

A resistência de selagem é a resistência máxima obtida ao separar duas tiras de filme seladas tomando com referência a largura inicial da amostra. A resistência de selagem é determinada mediante um ensaio de tracção (método quasiestático).

Coefficiente de fricção

A fricção ou atrito é a resistência que se opõe ao deslizar de duas superfícies colocadas uma sobre outra.

Temos que distinguir entre dois tipos de atrito:

- Fricção estática (ou de partida) que é o valor que deve ser ultrapassado como "valor inicial" para início do deslizamento.
- Atrito dinâmico (ou cinética) que é como um "valor médio" durante o deslizamento para manter uma velocidade constante definida.

O coeficiente de atrito é a relação entre a intensidade da força de atrito e a pressão aplicada perpendicular ao plano de deslizamento. É um parâmetro que varia consideravelmente ao longo do tempo, devido à migração de agentes deslizantes incorporados no filme.

Num filme, a migração dos aditivos é diferente em faces tratadas e não tratadas, por isso, é conveniente realizar as determinações de atrito entre todas as combinações de lados tratados e não tratados.

4. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Num mercado em constante evolução, o filme plástico BOPP tem mostrado um grande crescimento ao longo dos anos, e prevê-se que assim continue. Este crescimento afecta muitos outros sectores, como fabricantes de resinas poliméricas, de equipamentos industriais (especialmente fabricantes de extrusoras), etc.

Em relação às duas tecnologias mais utilizadas na produção de filmes de BOPP, pode-se concluir que o processo plano em duas fases é o mais utilizado a nível industrial. Isto deve-se ao facto de o processo apresentar uma óptima capacidade de produção, uma produtividade elevada, um controlo da operação e manutenção facilitados e, simultaneamente, permitir obter produtos com excelente flexibilidade.

O mercado de filmes BOPP tem mostrado, diante de tudo o que já foi exposto, uma grande atractividade. A sua evolução tem vindo a ser proporcional ao aumento do nível de exigência de transformadores e consumidores finais. O mercado tem exigido filmes com espessuras cada vez menores, com maior resistência (de uma maneira geral) e menor permeabilidade a gases e vapor-de-água. Simultaneamente, as características de transparência e brilho devem manter-se de acordo com os padrões actuais. Para atender às exigências de mercado, torna-se necessário conhecer o processo e propriedades do filme. Desta maneira, é de fundamental importância o estudo da relação entre processamento de produto e as propriedades finais e para tal é necessário haver o controlo de qualidade onde se faz uma análise ao filme fabricado. Como trabalho futuro sugere-se um aprofundamento do estudo do processo, estudando a influência das variáveis operacionais que apresentam influência directa sobre a morfologia final do filme. Complementarmente seria interessante estudar o processo de reciclagem do polipropileno.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Davin, J. Paulo; **1998**; "Tecnologia dos Materiais Plásticos"; Copyright. Universidade Aberta.
- [2] Barbardo, A. Carlos; Pouzada, António Sérgio; 1985; "Tecnologia de Materiais Modulo de Plástico"; Universidade do Minho.
- [3] Nome do site (www.bndes.gov.br/conhecimento/Bnset/polipr2a.pdf) – consultado em 30-01-2008
- [4] Nome do site (<http://www.furg.br/portaldeembalagens/tres/flexiveis.html>) – consultado em 8-02-2008
- [5] Nome do site (<http://www.plasticoscarone.com.br/siscarone/lenoticia.asp?id=24>) – consultado em 8-02-2008
- [6] Nome do site (<http://in3.dem.ist.utl.pt/master/thesis/00files/12thesis.pdf>) – consultado em 16-02-2008
- [7] Nome do site (<http://www.pcifilmes.com>) – consultado em 5-03-2008
- [8] Nome do site (<http://pt.wikipedia.org/wiki/Polipropileno>) – consultado em 12-03-2008
- [9] Nome do site (<http://plantdesign.iespana.es/Procesunit/pindice.htm>) – consultado em 26-02-2008
- [10] Nome do site (<http://es.wikipedia.org/wiki/Polipropileno>) – consultado em 11-03-2008
- [11] Nome do site (<http://www.pucrs.br/feng/cei/eder/aula01/processos.pdf>) – consultado em 13-03-2008
- [12] Nome do site (<http://www.coronabrasil.com.br/tratamento-filmes-pecas-plasticas.htm>) – consultado em 16-04-2008
- [13] Nome do site (<http://www.docerevista.com.br/edicoes/pdf/128/Embalagem.pdf>) – consultado em 9-04-2008
- [14] Nome do site (http://labinfo.cefetrs.edu.br/professores/andrei/it%20modulo%20i/apostila_it_unidade_2_extrusao_basica.pdf) – consultado em 12-03-2008
- [15] Nome do site (http://www.enq.ufrgs.br/cursos/grad/TrabConc/TCC_2005_1/trabalhos_pdf/TCC_Tiago_Portz.pdf) consultado em 8-02-2008
- [16] Nome do site (<http://www.colegiosaofrancisco.com.br/alfa/plasticos/historia-do-plastico-4.php>) consultado em 30-01-2008

[17] Nome do site

(<http://www.colegiosaofrancisco.com.br/alfa/plasticos/polipropileno.php>) consultado em 30-01-2008

[18] Nome do site (www.bruckener.com) consultado em 11-06-2008

[19] Maier, Clive; Calafut, Teresa; "Polypropylene: the definitive user guide and databook"; Plastics Design Library.

[20] Anton, M^a Rosa Gómez; Berecero, José Ramón Gil; "Los Plásticos y el Tratamiento de sus Residuos", Universidad Nacional de Educación a distancia