



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO PAULO
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS E
MANUFATURA



DISCIPLINA SMM0319 – MATERIAIS AVANÇADOS

PROFESSORA VERA LÚCIA ARANTES

GRUPO 4 – POLÍMEROS PARA APLICAÇÕES EXTREMAS

Nome:	Número USP:
Elisa Matalon	9313878
Gabriel Gustavo Soares Santos	10696486
Guilherme Sauchuk Sarja Diniz	9922248
Luís Felipe Roso Sordi	8549070
Laura Santos Bernard	11482451

SÃO CARLOS, SP.

OUTUBRO, 2019.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de polímeros resistentes a temperatura foi estimulado pela corrida espacial, entre as décadas 1950 até 1980 e subsequente aprimoramento na aviação comercial e militar. Porém, mais do que o desenvolvimento de novos polímeros, técnicas de manufatura e vias alternativas de síntese foram o foco de estudo, na tentativa de viabilizar a exploração comercial de materiais descobertos anteriormente. Por esse motivo, apenas materiais que tiverem sucesso tecnológico e obtiveram usos reais serão abordados neste trabalho. As propriedades de um polímero resistente a temperatura pode ser resumidos em três características básicas: retenção de propriedades mecânicas após longos ciclos de uso (alta temperatura de transição vítrea, alta temperatura de relaxamento), alta resistência a decomposição térmica e baixíssima reatividade (resistente a oxidação, hidrólise, pirólise). (CRITCHLEY, 1983).

Dessa forma os métodos de fabricação que serão apresentados visam alterar os mecanismos e as ligações a fim de atingir essas propriedades ao mesmo tempo que possibilita sua processabilidade.

O escopo deste trabalho será focado nas poliimidas, uma vez que o artigo base recomendado pela professora Vera trata apenas dessa família de polímeros. A análise será focada na relação inversamente proporcional entre propriedades versus processabilidade.

2 CLASSIFICAÇÃO

A classificação desses polímeros avançados com alta resistência térmica é dada através de sua aplicação e propriedades de interesse, uma vez que não existe uma definição fixa para o padrão de estabilidade térmica, onde a resistência ao calor é quando essa determinada propriedade continua sendo válida a temperatura máxima especificada. (CRITCHLEY, 1983)

Nos polímeros ocorrem dois tipos específicos de deterioração pela temperatura, reversíveis, onde há apenas o “amolecimento” do material, e os irreversíveis, onde ocorre degradação com a exposição prolongada. (CRITCHLEY, 1983)

Várias técnicas termoanalíticas (estudo da deterioração reversível e irreversível dos polímeros) são usadas para entender melhor as propriedades e melhor separá-los por aplicação, através de alteração em função da ocorrência da deterioração. A mais usada é a termogravimétrica pois é ampla e facilmente utilizada, através dela pôde-se notar fatores que

têm grande influência na estabilidade térmica dos polímeros. Como por exemplificado por Critchley (1983):

- **Peso molecular.** A estabilidade é prejudicada caso haja alguma irregularidade estrutural ou quebra nas extremidades, há casos também de despolimerização prejudicando as propriedades térmicas.
- **Ramificação da cadeia.** o aumento de grupos ramificados na cadeia polimérica afeta a estabilidade térmica devido aos efeitos cumulativos de degradação em cada ramificação, tanto que pode se considerar cadeias com poucas ramificações tem pouco efeito.
- **Reticulação.** Assim como no caso de ramificações, a reticulações em pequenas quantidades tem baixa influência, entretanto em alta quantidade interferem nas propriedades térmicas significadamente.
- **Tacticidade.** Ainda não há resultados conclusivos sobre o quanto essa afeta a estabilidade térmica .
- **Cristalinidade.** O grau de cristalinidade influência na estabilidade termo oxidativa (uma maneira de deterioração pelo ambiente e temperatura).
- **Detecção de impurezas.** Esse é um dos fatores mais danosos a estabilidade térmica, uma pequena presença de impureza pode causar mudanças catastróficas nas propriedades.
- **Mudança na estrutura química em função degradação.** Com o aumento da temperatura a energia interna das moléculas aumenta aumentando assim sua mobilidade sendo mais suscetível a reações, estas reações podem influenciar significadamente, pois podem acarretar todos os fatores anteriores.

3 MÉTODOS DE FABRICAÇÃO

Não existe uma única rota química para a sintetização de poliimidas, tampouco existe um único precursor. O início das pesquisas sobre esta classe de polímeros em meados da década de 1950, várias rotas foram testadas, vários precursores estudados assim como grupos laterais alternativos e alterações no monômero da cadeia principal. Ainda sim, podemos dividir as técnicas de síntese em dois grandes grupos: Síntese por reações de condensação, e síntese por reações de adição. (CRITCHLEY, 1983; HARRIS, 1990)

3.1 Síntese da condensação de poliimidas

Reações de condensação são caracterizadas pela liberação de uma pequena molécula após a reação e ligamento de dois reagentes. É muito utilizada para fazer a polimerização de poliamidas e dos poliésteres, mas também pode ser empregada na síntese de poliimidas. Nas próximas seções serão introduzidas algumas das poliimidas resultantes deste processo. (CRITCHLEY, 1983; SOLOMONS; FRYHLE, 2011)

3.1.1 Aromáticas

As poliimidas aromáticas podem ser sintetizadas por processos predominantemente similares aos de polímeros termoplásticos mais convencionais. A idéia inicial é usar a já conhecida rota de poli ciclocondensação para polimerização. (CRITCHLEY, 1983)

Polímeros solúveis foram largamente produzidos por esta técnicas, sendo que a solubilidade é função dos grupos laterais cíclicos acrescentados à cadeia principal. Entretanto, boa dos polímeros sintetizados por esta técnica não eram considerados termoplásticos em função de sua elevada Tg, por volta de 400°C. (CRITCHLEY, 1983)

Uma solução para isto foi a introdução de perfluoroalquileno e oxiperfluoroalquileno na cadeia principal, de forma a garantir que a macromolécula possua uma certa flexibilidade, mas sem comprometer a estabilidade térmica. (CRITCHLEY, 1983)

3.1.2 Amidas poliméricas heterocíclicas

As amidas poliméricas heterocíclicas não possuem o status comercial como as poliimidas comuns, porém, são amplamente estudadas devido à sua resistência a altas temperaturas. (CRITCHLEY, 1983)

A síntese de copolímeros de amidas e sistemas heterocíclicos segue a formação convencional da poliimida com monômeros contendo os heterocíclicos com com monômeros contendo o grupo amida, posteriormente um prepolímero solúvel é adicionado. (CRITCHLEY, 1983)

Após processamento é possível determinar as propriedades desses copolímeros, no entanto, os estudos são principalmente direcionados à aplicações em fibras. A única poliimida heterocíclica comercial é a “*isoindoloquinazolinedione-imide*” (PIQ), que possui fins elétricos. (CRITCHLEY, 1983)

3.2 Síntese de adição de poliimidas

Reações de adição são aquelas em que a reação entre reagentes não gera subprodutos, ou seja, no contexto de polímeros são reações em que uma molécula se une a outra sem que haja a formação de subprodutos. Poliimidas também podem ser sinterizadas por esta rota. (CRITCHLEY, 1983; SOLOMONS; FRYHLE, 2011)

3.2.1 De maleimidas

Poliimidas com ligações cruzadas são formadas a partir da polimerização térmica de bismaleimidas, a partir do aquecimento das mesmas na presença de radicais livres e estabilizadores. O aquecimento prolongado acima de 150°C possibilita a formação de ligações cruzadas, para melhorar a processabilidade é necessário aumentar a flexibilidade da cadeia central da bismaleimida ou utilizar uma terceira mistura que seria eutética. (CRITCHLEY, 1983)

3.2.2 De poliimidas pirolíticas

Poliimidas pirolíticas são produzidas a partir de um precursor de baixo peso molecular, que então é solubilizado. Em seguida um fino filme de um polímero poroso com grupos maleimidas e ciclopentadienos para haver atração química e permitir que o filme de poliimida seja formado. Em seguida o produto inteiro vai para um forno entre 275 e 350 graus centígrados. Dessa forma os polímeros bases são fundidos e eliminados, o solvente eliminado e a formação de ligações cruzada na poliimida é formada, dando assim suas propriedades. (CRITCHLEY, 1983; HARRIS, 1990)

4 APLICAÇÕES DAS POLIIMIDAS

A estabilidade química e termo oxidativa a altas temperaturas, associada às suas boas propriedades mecânicas, fazem com que as poliimidas sejam polímeros adequados para aplicações que envolvam altas temperaturas. Além disso, o fato de poderem ser sintetizadas a partir de vários precursores e por diferentes rotas faz com que esta classe de polímeros possua uma grande versatilidade, sendo possível o desenvolvimento sob medida para a aplicação desejada. (HERGENROTHER, 1990; WILSON, 1990)

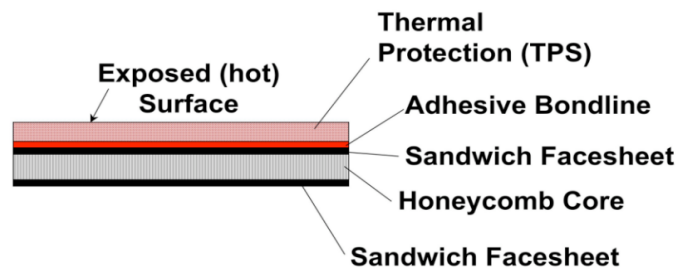
Atualmente poliimidas são comumente aplicados na indústria de semicondutores, como matriz de compósitos avançados, e na forma de filmes, adesivos e membranas. Estas

aplicações serão aqui brevemente apresentadas e discutidas. (WILSON; STENZENBERGER; HERGENROTHER, 1990)

4.1 Adesivos de alta performance

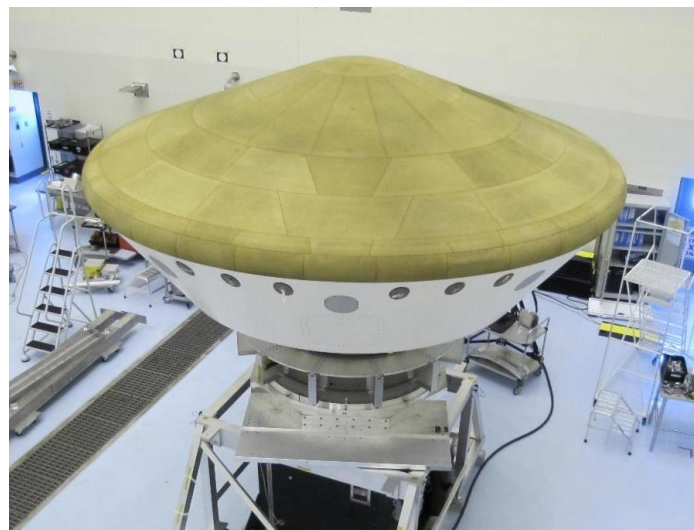
Adesivos de alta performance são geralmente empregados em ocasiões em que a confiabilidade e segurança exigidas, assim como as condições de serviço, são extremas. Um exemplo real de aplicação com esse tipo de exigência é a junção de sistemas de proteção térmica avançada e estruturas Honeycomb, usados nos *Aeroshells* de veículos de exploração espacial. A configuração descrita na Figura 1 foi a empregada no veículo que transportou o rover Curiosity até Marte, mostrado na Figura 2, com lançamento em novembro de 2011. (COLLINS, 2005; HERGENROTHER, 1990)

Figura 1 – Configuração estrutural do *Aeroshell*



Fonte: Collins et.al, 2005

Figura 2 – *Mars Science Laboratory Aeroshell* usado para transportar o rover Curiosity até Marte



Fonte: NASA, 2011

4.2 Matriz de compósitos avançados

Compósitos são materiais formados por duas ou mais fases distintas, sendo uma destas obrigatoriamente a matriz e as outras as fases dispersas. Esta classe de materiais é fundamentada no chamado princípio da ação combinada, que basicamente visa suprimir as deficiências e sobrelevar as qualidades dos materiais envolvidos através de sua combinação. (CALLISTER, 2013)

Compósitos mais tradicionais usam uma matriz epóxi com fibras, como as de carbono, aramida, vidro e boro. Eles costumam apresentar uma excelente razão entre resistência última e densidade, fazendo com que sejam amplamente usados na indústria aeroespacial. Entretanto, esses compósitos não são adequados para trabalhos em condições de temperaturas extremas, visto que sua matriz, responsável por garantir a transmissão de esforços entre fibras bem como protegê-las, não suporta temperaturas superiores a 140°C em média. (CALLISTER, 2013; WILSON, 1990)

Nesses casos em que temperaturas de serviço são elevadas, poliimidas podem ser usadas como matriz, já que suportam por horas temperaturas da ordem de 300°C, bem como podem suportar temperaturas de aproximadamente 550°C se o tempo de exposição for de curto. (WILSON, 1990)

Um resina de poliimidas mais aplicada na área de compósitos é a PMR-15, usada em prepregs e comercialmente disponível desde meados da década de 1970. Esta resina foi, por exemplo, utilizada no revestimento externo do núcleo do motor turbofan General Electric CF6 em associação com fibras de carbono, conforme pode ser visto nas Figuras Figura 3 e Figura 4, mostradas logo abaixo. Na primeira figura o núcleo pode ser identificado pela parte de cor prateada, na segunda imagem a última carenagem ao fundo é a que recobre o núcleo. (GE AVIATION, 2019b; WILSON, 1990)

Figura 3 – Motor GE CF6 instalado em um Airbus A330



Fonte: Silva, 2008

Figura 4 – Motor GE CF6 com carenagem aberta



Fonte: GE Aviation, 2019b

Esta mesma resina também é foi utilizada nos dutos de admissão e de by-pass do motor GE F404, mostrado na Figura 6, sendo que este possui uso militar, tanto que é o mesmo motor utilizados em novos aviões SAAB Gripen da Força Aérea Brasileira, exposto na Figura 5. (GE AVIATION, 2019a; SAAB, 2019; WILSON, 1990))

Figura 5 – SAAB Gripen



Fonte: SAAB, 2019

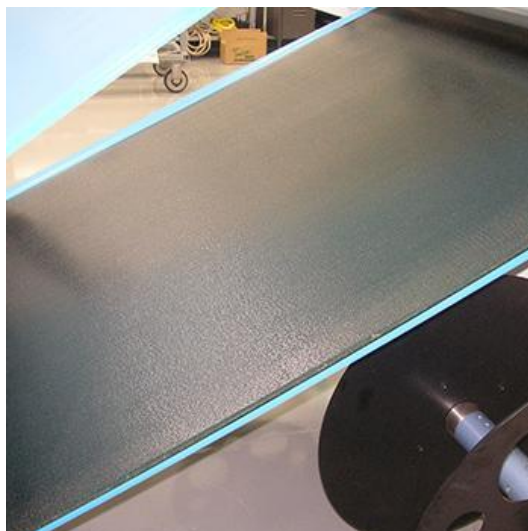
Figura 6 – Motor GE F404



Fonte: GE Aviation, 2019a

Vale mencionar que atualmente existem várias outras resinas além da PMR-15, como a tradicional SKYBOND® 703, e as RM-1100, AFR-PE-4 e MVK-14M, só para citar alguns exemplos. A figura abaixo mostra um prepreg de fibras de carbono e resina poliimida (Renegade Materials, 2019)

Figura 7 – Prepreg de fibras de carbono e resina poliimida



Fonte: Renegade Materials, 2019

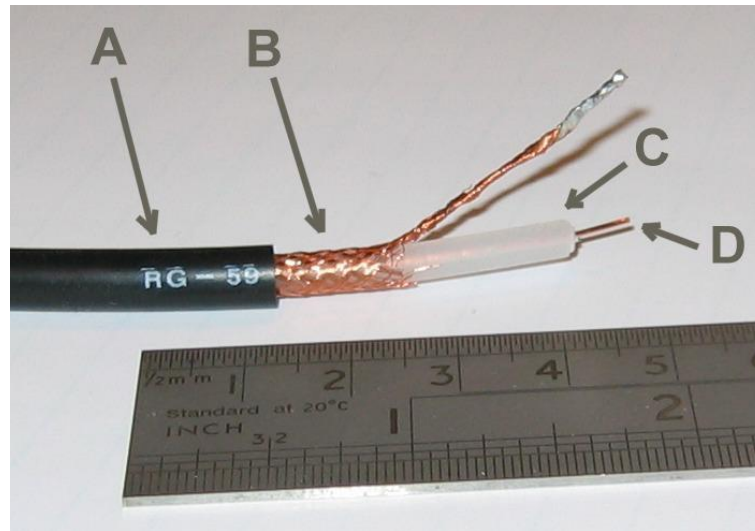
4.3 Aplicação na indústria de semicondutores e eletrônica

A aplicação de poliimidas no setor de semicondutores podem ser divididas em suas categorias principais: Proteção e intercamadas dielétricas. (SATOU; SUZUKI; MAKINO, 1990)

A proteção em si também pode ser subdividida em outras categorias, visto que pode se tratar de proteção térmica, contra raios alpha, mecânica e contra a despassivação da superfície, sendo que na maioria das vezes as poliimidas são usadas para dar mais de um tipo de proteção. (SATOU; SUZUKI; MAKINO, 1990)

Em cabos coaxiais e de fibra ótica, por exemplo, o isolador dielétrico, indicado pela letra C na Figura 8, é comumente fabricado a partir de poliimidas, sendo que este elemento além de oferecer isolamento dielétrico entre a tela e o núcleo também fornece proteção contra raios alpha, responsáveis por perdas e corrupção de dados, além de uma certa proteção contra esforços mecânicos. Em cabos de fibra ótica o princípio é o mesmo. (SATOU; SUZUKI; MAKINO, 1990)

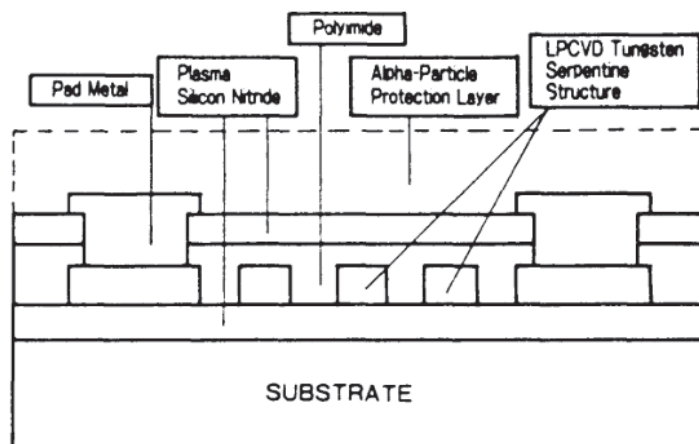
Figura 8 – Cabo Coaxial



Fonte: Wikimedia Commons, 2019

O polímero também pode ser aplicado à substratos de placas de circuito impresso, sendo responsável por garantir o isolamento entre as trilhas bem como para garantir proteção contra a despassivação e ataques químicos. A Figura 9 nos mostra um esquema dessa aplicação. (SATOU; SUZUKI; MAKINO, 1990)

Figura 9 – Aplicação em placa de circuito impresso

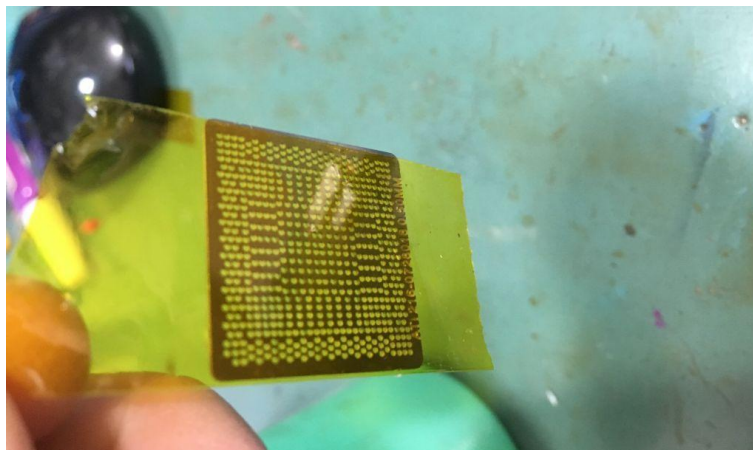


Fonte: Satou; Suzuki; Makino, 1990

Outro tipo aplicação comum que se refere à proteção térmica é o emprego de fitas de poliimida para procedimentos de solda e dessolda, como os envolvidos na fabricação e reparo

de circuitos eletrônicos. A Figura 10 mostra a fita em uso durante um destes procedimentos. (DUPONT, 2019; SATOU; SUZUKI; MAKINO, 1990)

Figura 10 – Uso de fita de poliimida para procedimento de reballing



Fonte: Eletrônica BR, 2016

4.4 Filmes e membranas

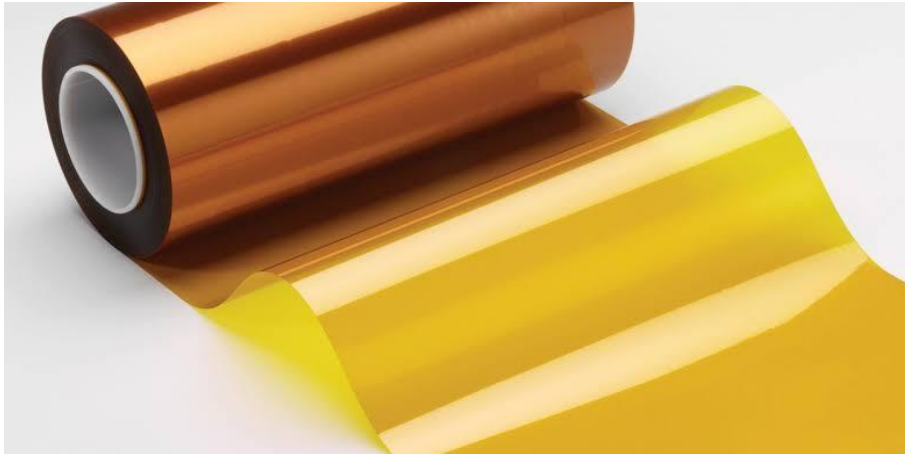
Filmes e membranas são o principal mercado das poliimidadas, tanto que por anos a fita Kapton® da Dupon foi maior representante desta classe, sendo que atualmente existem dezenas de variações desta mesma fita, o modelo 100B, por exemplo, é produzido com espessura de 25,4 μm , e apresenta uma tensão de ruptura de 241 MPa. A Tabela 1 sumariza as propriedades da linha Kapton® B, enquanto a Figura 11 mostra o aspecto deste filme. (DUPONT, 2019; SROOG,1990).

Tabela 1 – Propriedades típicas do filme Dupont Kapton® B à 23°C

Propriedade	100B	200B	300B	500B	Método de teste
Espessura (μm)	25.4	50.8	76.2	127	-
Densidade (g/cm^3)	1.72	1.72	1.72	1.72	ASTM D-1004-90
Tensão última (MPa)	241	255	255	241	ASTM D-882-91
Modulus, kpsi (MPa)	3034	3034	3034	3034	ASTM D-882-91
T _g aproximada (°C)	385	385	385	385	-
Encolhimento (% @200°C)	<0.1%	<0.1%	<0.1%	<0.1%	IPC-TM-650
Encolhimento (% @400°C)	<0.6%	<0.6%	<0.6%	<0.6%	IPC-TM-650
Rigidez dielétrica ($\text{V}/\mu\text{m}$)	110	106	87	36	ASTM D-149-94

Fonte: traduzido de Dupont, 2019

Figura 11 – Filme Dupont™ Kapton®



Fonte: Dupont, 2019

Vale mencionar que este filme mostrado na Figura 11 é o mesmo tipo que é utilizado em aplicações eletrônicas que envolvam solda e dessolda.

Membranas para separação de gases e líquidos podem ser construídas a partir de certas poliimidas. Essas membranas são de grande interesse, pois proporcionam uma economia energética da ordem de 90% quando comparadas a processos de separação convencionais, como a destilação. (MA; YANG, 2018; SROOG, 1990)

A primeira membrana comercial baseada em poliimidas surgiu em 1989, sendo oferecida pela UBE Industries e utilizada para a separação de H₂, em 1994 a Medal Company desenvolveu membranas para a separação de CO₂/CH₄, apesar disso esse tipo de membrana nunca alcançou a popularidade das baseadas em celulose. (MA; YANG, 2018)

5 ATUALIDADES E DESAFIOS FUTUROS

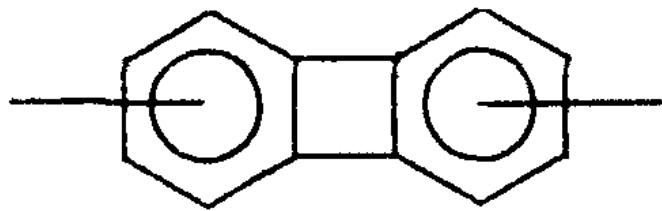
Desde os anos 80, os objetivos de desenvolvimento futuros eram de fabricar polímeros com melhor propriedades, mais baratos e processáveis, e estes são ainda objetivos atuais. Mais especificamente, um dos desafios é o aumento da estabilidade térmica trabalhando com polímeros inorgânicos. Outro desafio é superar o “*brick dust syndrome*”, ou seja, o fato que ganho de estabilidade térmica resulta em perda de processabilidade. (HERGENROTHER, 1990).

Várias formas de aumentar a solubilidade dos polímeros foram encontradas:

- Incluir grupos funcionais como ether, sulfone, thioether na estrutura da molecular

- Incluir grupos volumosos e estáveis pendentes na estrutura da molécula como fenil que vão reduzir a cristalinidade e a compactação do polímero deixando-o mais solúvel.
- Novos sistemas de solventes (ex: sal LiCl em DMF)
- Ao invés de produzir polímeros de alto peso molecular, produzir oligômeros que poderiam ser reticulados. Uma das funções mais recentes podendo ser reticulada é o bifenileno incorporada no centro da estrutura molecular, mostrada na Figura 12. Este é a forma mais atual. (CASSIDY, 1981)

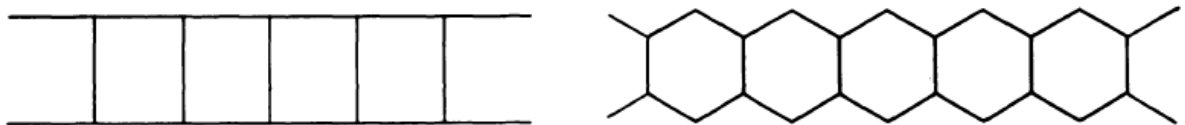
Figura 12 – Estrutura molecular do bifenileno



Fonte: Cassidy, 1981

Ademais, processos de sínteses usando os conceitos de “ladder polymers”, mostrados na Figura 13, e de ciclização intramolecular permitem de obter polímeros mais estáveis.

Figura 13 – Polímeros com estrutura “ladder”



Fonte: Critchley 1983

Neste caso, as duas ligações que devem ser cortadas para quebrar a cadeia polimérica são de estabilidade igual, o que permite a obtenção de um polímero mais estável também, como pode ser verificado através do TGA mostrado no Gráfico 1.

Gráfico 1 – TGA em polímero linear e em “ladder polymer”

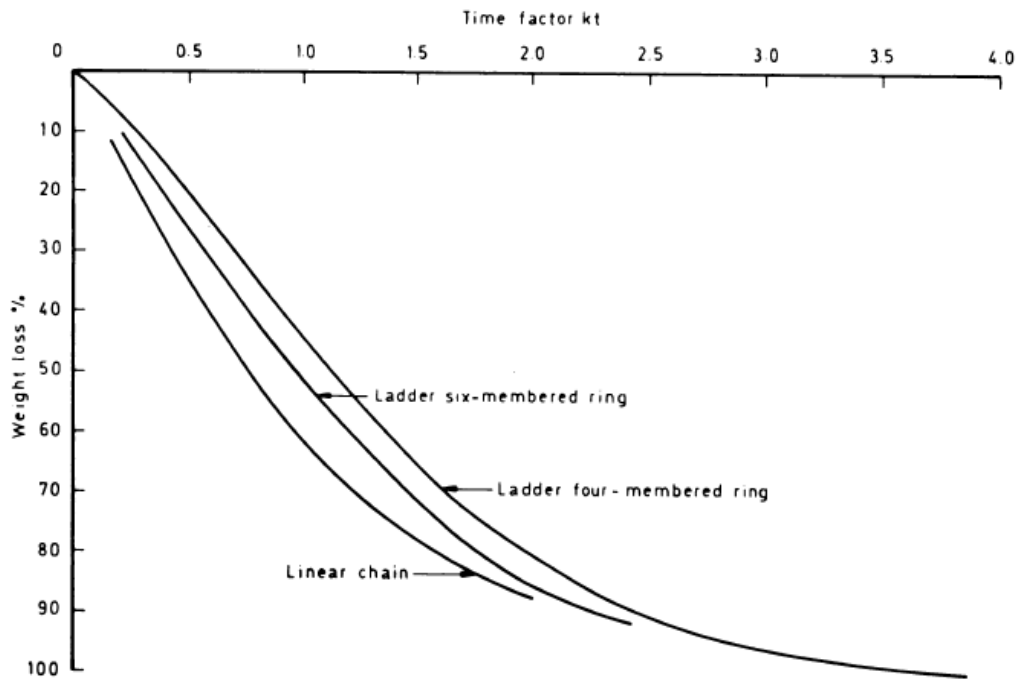


Figure 9.10. Loss in weight during thermal degradation of linear and ladder polymers. Reference 35.

Fonte: Critchley 1983

Existe também a Ciclização intramolecular, cujo princípio é sintetizar um polímero linear, que possa já possui uma mobilidade a baixa temperatura, mas que também possui pares de grupos pendentes capazes de passar por uma cicloadição intramolecular, deste jeito produzindo rigidez, aumentando a temperatura de uso além da temperatura de cura. (CRITCHLEY 1983)

Em relação às novas poliimidas criadas nos últimos anos, elas surgiram principalmente de laboratórios universitários ou governamentais, e não no comércio, principalmente porque as melhorias não justificavam os custos, mas também porque os produtos já existentes estão enraizados no mercado atual e as empresas não querem concorrência a menos que isto traga benefícios. Além disto, é caro introduzir um novo material no mercado com as regulações existentes, as responsabilidades e qualificações que tem de ser atingidas. (HERGENROTHER, 2002)

REFERÊNCIAS

- CALLISTER, William D. *Materials Science and Engineering an Introduction*. United States of America: Wiley, 2013.
- COLLINS, Timothy J *et al.* High-Temperature Structures, Adhesives, and Advanced Thermal Protection Materials for Next-Generation Aeroshell Design. 2005. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20060002549.pdf>>.
- CRITCHLEY, J P; KNIGHT, G. J; WRIGHT, W. W. *Heat-Resistant Polymers*. Boston, MA: Springer US, 1983. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-1-4899-0396-9>>.
- DUPONT. *Kapton® Polyimide films*. Disponível em: <<https://www.dupont.com/electronic-materials/kapton-polyimide-film.html>>. Acesso em: 08 out. 2019.
- ELETRÔNICA BR. *Reballing com fita kapton para evitar aquecimento no chip*. 2016. Disponível em: <<https://eletronicabr.com/forums/topic/81654-reballing-com-fita-kapton-para-evitar-aquecimento-no-chip/>>. Acesso em: 08 out. 2019.
- ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. NASA/JPL-CALTECH. . *Mars Science Laboratory Aeroshell with Curiosity Inside*. 2011. Disponível em: <https://www.nasa.gov/mission_pages/msl/multimedia/gallery/pia14758.html>. Acesso em: 08 out. 2019
- GE AVIATION. *F404 turbofan engines*. Disponível em: <<https://www.geaviation.com/sites/default/files/datasheet-F404-Family.pdf>>. Acesso em: 08 out. 2019a.
- GE AVIATION. *The CF6 Engine*. Disponível em: <<https://www.geaviation.com/commercial/engines/cf6-engine>>. Acesso em: 08 out. 2019b.
- HARRIS, F.W. Synthesis of aromatic polyimides from dianhydrides and diamines. In: WILSON, DOUG; STENZENBERGER, HORST D.; HERGENROTHER, PAUL M. (Org.). . *Polyimides*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1990. p. 1–35. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-94-010-9661-4>>.
- HERGENROTHER, P. M. Polyimides as adhesives. In: WILSON, DOUG; STENZENBERGER, HORST D.; HERGENROTHER, PAUL M. . (Org.). *Polyimides*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1990. p. 158–186. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-94-010-9661-4>>.
- MA, Xiao-Hua; YANG, Shi-Yong. Polyimide Gas Separation Membranes. *Advanced Polyimide Materials*. Beijing: Elsevier, 2018. p. 257–322. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-812640-0.00006-8>>.
- RENEGADE MATERIALS. *POLYIMIDE PREPREGS*. Disponível em: <<http://www.renegadematerials.com/products/prepregs/polyimide-prepregs/>>. Acesso em: 08 out. 2019.
- SAAB. *Gripen C/D*. Disponível em: <<https://saab.com/pt/air/gripen-fighter-system/gripen/gripen-cd/>>. Acesso em: 08 out. 2019.

SATOU, H.; SUZUKI, H.; MAKINO, D. Polyimides for semiconductor applications. In: WILSON, DOUG; STENZENBERGER, HORST D.; HERGENROTHER, PAUL M. (Org.). . *Polyimides*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1990. p. 227–251. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-94-010-9661-4>>.

SILVA, Sean D.. *Airbus A330-203*. 2008. Disponível em: <<https://www.jetphotos.com/photo/6991416>>. Acesso em: 08 out. 2019.

SOLOMONS, Graham; FRYHLE, Craig B... *Organic Chemistry*. United States of America: Wiley, 2011.

SROOG, C.E. Films, mouldings and other applications. In: WILSON, DOUG; STENZENBERGER, HORST D.; HERGENROTHER, PAUL M. (Org.). . *Polyimides*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1990. p. 252–284. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-94-010-9661-4>>.

WIKIMEDIA COMMONS. *RG-59.jpg*. Disponível em: <<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RG-59.jpg>>. Acesso em: 08 out. 2019.

WILSON, Doug. Polyimides as resin matrices for advanced composites. In: WILSON, DOUG; STENZENBERGER, HORST D.; HERGENROTHER, PAUL M. (Org.). . *Polyimides*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1990. p. 187–226. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-94-010-9661-4>>.

WILSON, Douglas. PMR- 15 processing, properties and problems - a review. *British Polymer Journal*, v. 20, n. 5, p. 405–416, 1988.