

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MAKENZIE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE MATERIAIS

MARCIO RUBENS XAVIER BARTHOLOMEI

CARACTERIZAÇÃO DE FORMAS DE POLÍMERO DE CRISTAL LÍQUIDO  
PARA INDÚSTRIAS DE PANIFICAÇÃO EM SUBSTITUIÇÃO AS FORMAS  
TRADICIONAIS DE AÇO CARBONO

São Paulo  
2010

# **Livros Grátis**

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

Milhares de livros grátis para download.

MARCIO RUBENS XAVIER BARTHOLOMEI

FORMAS POLIMÉRICAS PARA INDÚSTRIA DE PANIFICAÇÃO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

ORIENTADORA: PROFA. DRA. SONIA BRAUNSTEIN FALDINI

São Paulo  
2010

B287c Bartholomei, Marcio Rubens Xavier.

Caracterização de formas de polímero de cristal líquido para indústrias de panificação em substituição as formas tradicionais de aço carbono / Marcio Rubens Xavier Bartholomei – 2009.  
78 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) –  
Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2009.  
Bibliografia: f. 77-78.

1. Polímeros de cristal líquido. 2. Vectra. 3. Indústria de panificação. I. Título.

CDD 668.9

MARCIO RUBENS XAVIER BARTHOLOMEI

FORMAS POLIMÉRICAS PARA INDÚSTRIA DE PANIFICAÇÃO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Apresentado em:

BANCA EXAMINADORA

---

Profa. Dra. Sonia Braunstein Faldini – Orientadora  
Universidade Presbiteriana Mackenzie

---

Profa. Dra. Leila Figueiredo de Miranda  
Universidade Presbiteriana Mackenzie

---

Prof. Hélio Wiebeck  
Universidade de São Paulo

Dedico este trabalho à minha mãe, ao meu falecido pai e a toda minha família, que sempre me apoiaram em todos os meus projetos de vida e, à minha esposa Suellen, que soube ceder os momentos de convivência para minha dedicação a este trabalho.

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela benção da minha vida e de minha saúde.

À Professora Doutora Sonia Braunstein Faldini, orientadora desta dissertação, pelo interesse, incentivo e paciência na realização deste trabalho, assim como pela amizade que demonstrou neste período.

Aos Professores Doutores Leila Figueiredo de Miranda e Mauro César Terence pelas valiosas sugestões e correções.

A todos os Professores do Programa que direta ou indiretamente participaram da minha formação para a elaboração desta dissertação.

À Ticona do Brasil que na pessoa da Simone, Gerente de Desenvolvimento de Novos Produtos e Mercados, que não poupou esforços no fornecimento de informações e materiais para testes práticos e laboratoriais sem os quais este trabalho não poderia ter sido desenvolvido.

Aos profissionais da Bimbo do Brasil que demonstraram interesse e boa vontade em tudo que lhes foi solicitado.

Aos técnicos do Laboratório de Caracterização de Materiais da UPM, que não mediram esforços para que este trabalho pudesse ser realizado.

À Bibliotecária Maria Regina Trugulio pelo apoio no levantamento de dados.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Esquema 1	a) Molécula com formato de um bastão; b) Molécula com a forma de um disco.....	20
Esquema 2	a) Estrutura do mesôgeno 2-butiloxi-6pent-1-inil-naftaleno, C 51,0 (N 23,0) I que apresenta mesomorfismo próximo à temperatura ambiente; b) Estrutura de mesôgeno 4-etinilfenil-4noniloxibifenalato, C 100 Sc 108 Sb 127 As 212 N 219 I.....	21
Desenho 1	Organização de cadeias poliméricas nos estados sólidos e líquidos.....	21
Fotografia 1	Diferentes tipos de pães.....	24
Fotografia 2	Pão doce trançado.....	24
Esquema 3	Demonstrativo de linha de produção de pão de forma.....	25
Fluxograma 1	Etapas do Processamento do Pão Tradicional Pullman - PP (9101).....	26
Fotografia 3	Sistema de entrada e saída do Forno.....	27
Fotografia 4	Depanner, equipamento localizado após o Forno.....	27
Fotografia 5	Depanner, equipamento localizado após o Forno.....	27
Desenho 3	Projeto forma para Pão Integral.....	28
Fotografia 6	Formas de Polímero de Cristal Líquido.....	29
Desenho 4	Demonstrativo para Formas de PLC.....	29
Quadro 1	Condições para o processamento dos corpos de prova.....	33
Desenho 5	Processamento do E540i durante a extrusão.....	34
Fotografia 7	Corpos de provas utilizados nos ensaios mecânicos. a) ensaios de impacto; b) ensaios de tração.....	34
Desenho 6	Demonstrativo de equipamento para ensaio de resistência Ao impacto.....	39
Fotografia 8	Equipamento Tinius Olsen Modelo 92T.....	40
Fotografia 9	Equipamento para ensaio de tração Q-Test.....	41
Desenho 7	Corpo de Prova para Tração.....	42
Fotografia 10	Equipamento Tinius Olsen modelo HD94/398. a) Vista geral do Equipamento Tinius Olsen; b) Equipamento antes do ensaio; c) Equipamento durante o ensaio.....	44
Desenho 8	Equipamento para Caracterização Térmica.....	45
Fotografia 11	a) posicionamento dos pesos de apoio; b) material saindo pelo orifício de escoamento; c) processo de pesagem das amostras.....	47
Fotografia 12	Amostras Vectra E540i para ensaio de fluidez.....	48
Fotografia 13	Sistema para ensaio de dureza Shore.....	49

Fotografia 14	Amostras de Corpos de Provas com tratamento térmico de 300°C.....	51
Fotografia 15	Corpo de prova após tratamento térmico a 300°C.....	52
Fotografia 16	Detalhe da região da bolha mostrada na Fotografia 12.....	52
Fotografia 17	Corpo de prova a 400°C.....	53
Fotografia 18	Corpo de Prova a 500°C.....	53
Fotografia 19	Corpo de Prova a 500°C.....	54
Fotografia 20	Corpo de Prova a 600°C.....	54
Fotografia 21	Pirólise do Vectra E540i.....	55
Fotografia 22	Pirólise do Vectra E540i: verificação de vapores ácidos.....	55
Fotografia 23	Ensaio de inflamabilidade - Queima logo após a retirada do bico de Bunsen.....	57
Fotografia 24	Ensaio de inflamabilidade ausência da fonte de chama – Material apagado.....	57
Quadro 2	Solubilidade em diversos solventes orgânicos.....	58
Quadro 3	Inchamento em diversos solventes orgânicos.....	58
Fotografia 25	Corpo de prova do Vectra E540i em H <sub>2</sub> O desmineralizada, após 400 dias.....	59
Quadro 4	Solubilidade em água desmineralizada.....	59
Quadro 5	Inchamento em água desmineralizada.....	59
Fotografia 26	Corpo de prova em H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 40 %, logo após imersão.....	60
Fotografia 27	Corpo de prova em H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 60 %, logo após imersão.....	60
Fotografia 28	Corpo de prova em H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 80 %, logo após imersão.....	60
Fotografia 29	Corpo de prova em H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 98%, logo após imersão.....	60
Fotografia 30	Corpos de prova no início da imersão em H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 80% (4) e 98% (5).....	61
Fotografia 31	Corpo de prova após 1 hora: imersão em H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 98%.....	61
Fotografia 32	Corpos de prova após 7 dias: imersão em H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 80% (4) e 98%.....	61
Fotografia 33	Posicionamento dos corpos de prova no equipamento para ensaio de radiação Ultravioleta. Extremidade inferior dos corpos de prova apoiada no equipamento.....	62
Fotografia 34	Detalhamento do posicionamento dos corpos de prova no equipamento para ensaio de radiação Ultravioleta. Extremidade inferior dos corpos de prova apoiada no equipamento.....	62
Fotografia 35	Diferença de coloração do corpo de prova após ensaio UV. Na região apoiada no equipamento, a cor é mais clara.....	63

Fotografia 36	Diferença na coloração entre a região exposta à radiação UV e a região apoiada no equipamento.....	63
Fotografia 37	Transporte de formas antes de carregar com massa de pão.....	64
Fotografia 38	Aspecto da fratura após o ensaio.....	65
Micrografia 1	Caracterização do Vectra E540i por microscopia eletrônica de varredura. Presença de talco.....	65
Gráfico 1	Comparativo de Dureza Shore em diferentes temperaturas.....	67
Gráfico 2	Alongamento Final: efeito da temperatura de exposição do Vectra E540i.....	68
Gráfico 3	Tensão Máxima de Escoamento: efeito da temperatura de exposição do Vectra E540i.....	68
Gráfico 4	Módulo de elasticidade: efeito da temperatura de exposição do Vectra E540i.....	68
Gráfico 5	Comparativo do alongamento final em diferentes tempos de exposição ao Ultravioleta.....	69
Gráfico 6	Comparativo da Tensão Máxima em diferentes tempos de exposição ao Ultravioleta.....	69
Gráfico 7	Comparativo do Módulo de Elasticidade em diferentes tempos de exposição ao Ultravioleta.....	70
Fotografia 39	Corpo de prova em posição para teste HDT e agulha para penetração no corpo de prova no ensaio VICAT.....	71
Fotografia 40	Resultado dos Ensaio HDT e VICAT respectivamente.....	72
Fotografia 41	Análise visual de parte superior de pães após assamento em formas de Vectra e em formas de aço.....	73
Fotografia 42	Análise visual de parte superior de pães após assamento em formas de Vectra e em formas de aço.....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Comparativo entre custos das formas em aço carbono com tratamento antiaderente e formas de polímero de cristal líquido.....	30
Tabela 2	Controle de ciclos de formas. Fonte: Bimbo do Brasil.....	31
Tabela 3	Composição percentual do VE E540i.....	32
Tabela 4	Composição percentual do VE E950i RX NATURAL.....	32
Tabela 5	Composição percentual do VE LKX1231 BLACK.....	33
Tabela 6	Ensaio realizados e as respectivas normas.....	35
Tabela 7	Ensaio de Resistência ao Impacto.....	64
Tabela 8	Resultados ensaio de Dureza Shore D.....	66
Tabela 9	Resultados do Ensaio de Índice de fluxo à fusão (MFI).....	71
Tabela 10	Temperatura de Distorção Térmica HDT e Ponto de Amolecimento VICAT.....	72

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	16
1.2	OBJETIVO ESPECIFICO.....	16
1.3	JUSTIFICATIVA.....	17
1.4	METODOLOGIA.....	17
<b>2</b>	<b>REFERÊNCIA TEÓRICA.....</b>	<b>19</b>
2.1	CRISTAIS LÍQUIDOS.....	19
<b>2.1.1</b>	<b>Cristais Líquidos Termotrópicos.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Cristais Líquidos Liotrópicos.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Mesôgenios.....</b>	<b>21</b>
2.2	POLÍMERO DE CRISTAL LÍQUIDO.....	21
<b>2.2.1</b>	<b>Classificação dos Polímeros de Cristal Líquido.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Polímeros de Cristal Líquido Comerciais.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Vectra E540i.....</b>	<b>23</b>
2.3	INDÚSTRIA DA PANIFICAÇÃO.....	24
<b>2.3.1</b>	<b>Processo de Obtenção de Pães.....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Formas Metálicas.....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Formas de Vectra E540i.....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Custos.....</b>	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>32</b>
3.1	MATERIAIS.....	32
3.2	MÉTODOS.....	33
<b>3.2.1</b>	<b>Confecção dos Corpos de Prova.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Tratamento Térmico dos Corpos de Prova.....</b>	<b>35</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Ensaio Físico-Químicos.....</b>	<b>36</b>
3.2.3.1	Ensaio Preliminares.....	36
3.2.3.2	Reatividade, Solubilidade ou Inchamento do Vectra E540i.....	36
3.2.3.3	Fusibilidade e Inflamabilidade do Vectra E540i.....	37
<b>3.2.4</b>	<b>Resistência à Degradação por Radiação Ultravioleta.....</b>	<b>37</b>
3.2.4.1	Condições para o Ensaio.....	37
3.2.4.2	Preparação das Amostras.....	38
3.2.4.3	Execução do Ensaio.....	38
<b>3.2.5</b>	<b>Ensaio de Resistência ao Impacto (Izod).....</b>	<b>38</b>
3.2.5.1	Preparação das Amostras.....	39

3.2.5.2	Condições para o Ensaio.....	40
3.2.5.3	Execução do Ensaio.....	40
<b>3.2.6</b>	<b>Ensaio de Tração.....</b>	<b>41</b>
3.2.6.1	Preparação das Amostras.....	42
3.2.6.2	Condições para o Ensaio.....	43
3.2.6.3	Execução do Ensaio.....	43
<b>3.2.7</b>	<b>Temperatura de Distorção Térmica – HDT (°C) e Ponto de Amolecimento VICAT (°C).....</b>	<b>43</b>
3.2.7.1	Condições para o Ensaio.....	45
3.2.7.2	Preparação das Amostras.....	45
3.2.7.3	Execução do Ensaio.....	46
<b>3.2.8</b>	<b>Índice de Fluidiez.....</b>	<b>46</b>
3.2.8.1	Descrição de Equipamento.....	47
3.2.8.1	Execução de Ensaio.....	47
<b>3.2.9</b>	<b>Ensaio de Dureza Shore-D.....</b>	<b>48</b>
3.2.9.1	Condições para o Ensaio.....	49
3.2.9.2	Preparação das Amostras.....	49
3.2.9.3	Execução do Ensaio.....	50
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>51</b>
4.1	RESISTÊNCIA A TRATAMENTO TÉRMICO.....	51
4.2	ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS.....	54
<b>4.2.1</b>	<b>Composição Química do Polímero.....</b>	<b>55</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Composição da Carga Mineral.....</b>	<b>56</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Fusibilidade.....</b>	<b>56</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Inflamabilidade.....</b>	<b>56</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Solubilidade e Inchamento.....</b>	<b>58</b>
<b>4.2.6</b>	<b>Reatividade em Ácido Sulfúrico.....</b>	<b>60</b>
4.3	ENSAIO DE DEGRADAÇÃO AO ULTRAVIOLETA (UV).....	61
4.4	ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO (Izod).....	63
4.5	ENSAIO DE DUREZA SHORE-D.....	66
4.6	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	67
<b>4.6.1</b>	<b>Efeito de Temperatura.....</b>	<b>67</b>
<b>4.6.2</b>	<b>Efeito de Exposição ao UV.....</b>	<b>69</b>
4.7	ÍNDICE DE FLUIDEZ.....	70
4.8	TEMPERATURA DE DISTORÇÃO TÉRMICA HDT E PONTO DE AMOLECIMENTO VICAT.....	71

4.9	TESTES PRÁTICOS.....	72
4.10	DISCUSSÃO FINAL.....	74
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>76</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>77</b>

## RESUMO

As indústrias de panificação usam formas de aço carbono revestidas com camada antiaderente sendo que estas formas têm uma vida útil de 10.000 ciclos de produção (3 anos a 3,5 anos) e tem custo elevado. Com o intuito de diminuir este custo, estas indústrias poderiam substituir as formas convencionais por formas a base de um polímero de cristal líquido comercial, Vectra® E540i. Neste trabalho foram avaliadas as propriedades mecânicas e físico-químicas deste polímero, tendo em vista esta substituição, sem prejuízo da qualidade do pão obtido. Devido à necessidade de se usar as formas num forno com temperaturas elevadas, as amostras foram submetidas a tratamento térmico em várias temperaturas, acima e abaixo das temperaturas do cozimento no forno e, posteriormente, foi verificado o efeito da temperatura na resistência à tração e na dureza do material. Também foram realizados ensaios de degradação por radiação ultravioleta (UV) e verificou-se seu efeito sobre a resistência a tração e impacto. Além destes ensaios laboratoriais, a resistência das formas e a qualidade do pão foram testadas numa planta piloto. Os resultados mostram que não há degradação frente à radiação UV, após exposição constante durante 80 dias, bem como as resistências à tração e ao impacto não foram afetadas. Observou-se que não há grandes alterações nas propriedades mecânicas devido ao aquecimento em que o polímero é submetido durante a sua passagem dentro do forno. Amostras aquecidas em temperaturas acima de 275°C apresentaram a formação de bolhas visíveis a olho nu, sugerindo degradação térmica do polímero. Nestas temperaturas, as propriedades mecânicas citadas apresentam valores inferiores aos esperados. Em escala piloto, a qualidade do pão não se alterou. A partir deste estudo a Empresa poderá tomar a decisão de continuar a utilizar as atuais formas metálicas ou substituir por formas a base do polímero de cristal líquido comercial Vectra®E540i.

Palavras chave: Polímeros de Cristal Líquido. Vectra E540i. Indústria de panificação.

## ABSTRACT

The bakery uses forms of carbon steel coated with nonstick layer and these forms have a lifespan of 10,000 cycles of production (3 years to 3.5 years) and are expensive. In order to reduce this cost, these industries could replace conventional forms by forms of a commercial liquid crystal polymer, Vectra® E540i. The present study evaluated the mechanical and physicochemical properties of this polymer, in view of this replacement, without prejudice to the quality of the bread obtained. Because of the need to use forms in an oven at high temperature, the samples were subjected to heat treatment at various temperatures above and below the temperature of cooking in the oven and then observed the effect of temperature on tensile strength and hardness of the material. Tests of degradation by ultraviolet (UV) were also conducted and found its effect on the tensile strength and impact. In these laboratory tests, the resistance of the forms and quality of bread were tested in a pilot plant. The results show that there is no degradation after constant exposure to UV radiation for 80 days and the tensile strength and impact were not affected. There were no significant changes in mechanical properties due to heating. It was observed that no major changes in mechanical properties due to heating in the polymer are subjected during its passage in the oven. At these temperatures, the mechanical properties mentioned are lower than expected. In a pilot scale, the quality of bread has not changed. From this study, the Company may decide to continue using the current metallic forms or replace them with forms of liquid crystal polymer Vectra® E540i.

Keywords: Liquid crystal polymers. Vectra E540i. Baking industry.

## 1 INTRODUÇÃO

Polímeros de cristal líquido (LCP) são compostos por moléculas estendidas e com formato de bastões, fluem como líquidos e possuem anisotropia ótica e eletromagnética como sólidos cristalinos. Comparados aos polímeros convencionais, são resistentes a solventes, apresentam excelentes propriedades de barreira, baixo coeficiente de expansão térmica, baixa absorção de água e são pouco inflamáveis. Quando fundidos apresentam baixa viscosidade e se sujeitos a cisalhamento ou fluxo de estiramento, como é o caso em todas as operações de processamento de termoplásticos, as macromoléculas rígidas se ordenam em fibras e fibrilas, que se congelam quando o fundido se resfria. Praticamente não contraem e seu tempo de solidificação é muito baixo. A estrutura polimérica rígida linear resulta em uma melhoria significativa do perfil de propriedades mecânicas dos polímeros convencionais, especialmente paralelo à direção de orientação (ATKINS, 2001; CALLISTER, 2002; WANG, 2002).

Os poliésteres são um grupo importante desta classe de polímeros. Alguns copoliésteres termotrópicos de importância comercial são sintetizados a partir de: a) ácido p-hidroxi-benzóico (HBA) e ácido 6-hidroxi-2-naftóico (HNA); b) ácido p-hidroxi-benzóico (HBA), ácido tereftálico (TA), ácido isoftálico (IA) e bisfenol (BPA); c) etilenoglicol (EG) e dos ácidos p-hidroxi-benzóico (HBA) e tereftálico (TA).

Vectra® LCP é uma família de polímeros de cristal líquido (LCP) de alto desempenho baseada na tecnologia da indústria Ticona. Muitas das aplicações do Vectra® LCP se devem às propriedades de barreira dos cristais líquidos aliadas a um baixo coeficiente de expansão térmica, resistência química e dureza. Os diferentes tipos para moldagem por injeção de Vectra® LCP diferem com respeito à temperatura de fusão, resistência térmica e capacidade de fluxo. A incorporação de cargas e materiais de reforço como fibras de vidro e carbono, minerais, grafite, PTFE e combinações destes permitem a adaptação destes polímeros básicos aos requisitos de muitos setores como de saúde, telecomunicações, automobilístico e embalagens entre outros (ELAMIN, 2008; FLODBERG, 2008; TICONA, 2001b; TICONA, 2008b).

A produção de pães no Brasil e também no mundo, tem se modernizado desde estabelecimentos de produção artesanal como padarias até produção em escala industrial.

No processamento de pães do tipo pão de forma, a fermentação final e o cozimento são etapas críticas do processo. Nestas etapas as formas de pão têm importante papel no processo, pois tem a função de um molde que dará a forma final ao pão. Além da

função de molde, as formas devem ter temperatura de fusão acima de 300°C, tendo em vista a temperatura do forno de cozimento que pode atingir temperaturas desta ordem. Também devem ter a capacidade de realizar uma adequada troca térmica e apresentar adequada resistência mecânica. Por último precisam ser antiaderentes, para que o pão já cozido seja retirado com facilidade da forma por um sistema que utiliza vácuo para sucção juntamente com ventosas, sem que haja deformações e perdas de partes deste devido à aderência às formas, levando em consideração que o pão tem entre seus principais ingredientes: farinha, água, sal e fermento (ABIP).

Atualmente as formas de pães são feitas em aço carbono com tratamento antiaderente que consiste na aplicação de filmes de polímeros a base de flúor ou silicone. Este tratamento deve ser refeito anualmente e tem um elevado custo. A substituição das formas de aço por formas de polímero de cristal líquido é uma opção que necessita ser avaliada.

Com a finalidade de substituir as formas de aço por formas de polímero de cristal líquido, o presente estudo trata da caracterização por métodos mecânicos, físicos e químicos de formas confeccionadas com um polímero de cristal líquido contendo 40% de carga mineral (marca comercial Vectra® E540i) e sua ambientação em uma indústria de panificação.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Através de ensaios laboratoriais, este trabalho tem como objetivo fornecer informações que auxiliem a indústria Bimbo do Brasil a decidir sobre qual opção é economicamente mais viável para o processo: as formas de aço com tratamento antiaderente ou as formas de polímero de cristal líquido, sem perda da qualidade atual dos produtos das linhas de pão branco e integral ou até mesmo melhorá-la.

## 1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Determinar as propriedades de resistência mecânica em ensaios de tração e impacto.

Verificar a resistência térmica, a degradação ao Ultravioleta e a reatividade química do polímero.

Avaliar as características de assamento para a tomada de decisão sobre a <sup>1</sup>substituição de formas de aço por formas de LCP.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

As formas de pães feitas em aço carbono necessitam de tratamento antiaderente para desenformar o pão após o assamento. Este tratamento pode ser feito no máximo quatro vezes em 10.000 ciclos ou três anos de uso contínuo das formas. Neste período o custo total por forma com os quatro tratamentos antiaderente é de R\$500,00 (BIMBO do BRASIL, 2008)<sup>1</sup>.

A escolha do Vectra® E 540i, para obtenção de formas usadas no processo de panificação se deve ao fácil processo por injeção deste polímero, o que permite a obtenção de formas para a produção de pães brancos e de pães da linha saudável entre outros. As informações da Ticona indicam que estas formas são capazes de suportar as altas temperaturas dos fornos de indústrias de panificação além de ter baixo empenamento e aspecto superficial liso em estado sólido (TICONA, 2001 b).

O ganho financeiro com a substituição das formas de aço pelas formas de polímero de cristal líquido foi estimado em 12,0%, o que justificaria juntamente com as propriedades mecânicas e térmicas do Vectra este estudo (BIMBO DO BRASIL, 2008; TICONA, 2001b1).

### 1.4 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho se deu com testes práticos na linha de produção número 2 da unidade fabril da Bimbo do Brasil em São Paulo. Também se deu com testes na planta piloto da unidade fabril da Bimbo do Brasil em São Paulo, destinado ao desenvolvimento de novos produtos. Paralelamente, corpos de prova do polímero de cristal líquido Vectra E540i, cedidos pela Empresa Ticona do Brasil, foram submetidos a ensaios mecânicos, físicos e químicos. Todos os ensaios foram realizados nos laboratórios de caracterização de materiais da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana, na unidade São Paulo.

---

<sup>1</sup> Informações fornecidas pela Empresa Bimbo do Brasil.

Nos testes práticos, formas de Vectra E540i foram inseridas na linha de produção juntamente com as formas de aço percorrendo ciclos completos de manufatura do pão tradicional PP (código de produto 9101). Estes testes foram realizados durante um processo normal de produção com as formas de Vectra E540i sendo abastecidas com massa de pão e percorrendo todos os transportes do ciclo de produção.

## 2 REFERÊNCIA TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos teóricos necessários ao desenvolvimento do trabalho.

### 2.1 CRISTAIS LÍQUIDOS

A descoberta do estado líquido cristalino é atribuída ao botânico austríaco Friedrich Reintzer (1888) que observou a fusão de uma amostra sólida (ésteres de colesterol) para um líquido turvo e sua transformação num líquido transparente e isotrópico com o aumento da temperatura. Com estas evidências, Lehmann reconheceu a existência de um novo estado entre os estados sólido e líquido que denominou cristal líquido.

Este novo estado da matéria é também conhecido como mesofase do grego mesos que significa intermediário. Dependendo de sua estrutura molecular, um sistema pode passar por várias mesofases até chegar ao líquido isotrópico. Os principais tipos de mesofases que foram identificados são: o estado esméctico do grego smegma (sabão), o estado nemático (do Grego nema que significa filamento) e o estado colestérico observado em sistemas contendo moléculas com um centro quiral.

Para a formação de cristais líquidos é essencial que as moléculas ou grupos de moléculas que os compõem possuam uma forte anisotropia na sua forma, como um bastão ou um disco. Essas moléculas podem apresentar uma ordem posicional de curto alcance e orientacional de longo alcance o que lhe confere uma anisotropia nas suas propriedades elétricas, magnéticas e ópticas.

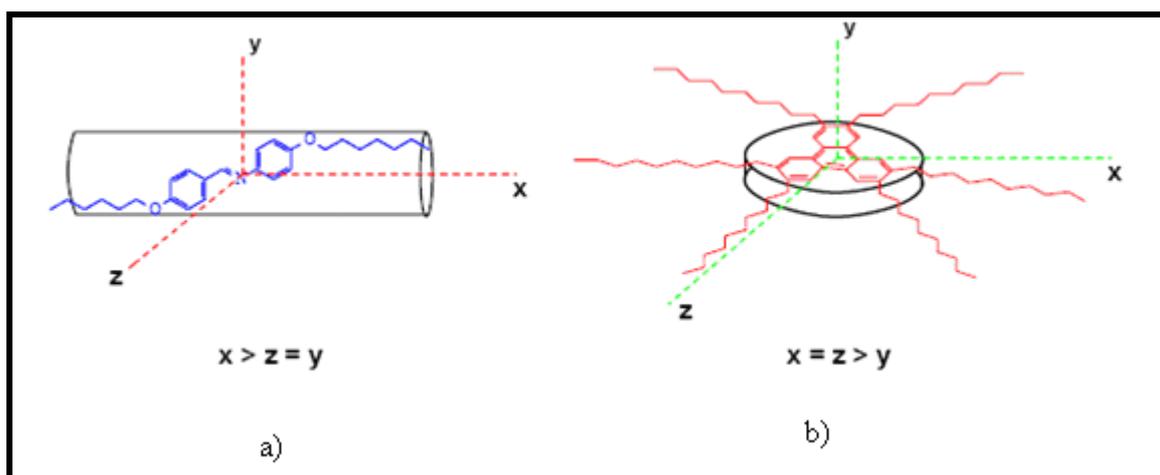
Os cristais líquidos podem ser agrupados em duas grandes famílias de acordo com sua obtenção: cristais líquidos termotrópicos obtidos por aquecimento do composto puro e cristais líquidos liotrópicos obtidos pela mistura das moléculas com um solvente. A unidade estrutural fundamental dos cristais líquidos termotrópicos é a molécula, enquanto que nos cristais líquidos liotrópicos é a micela. Os parâmetros relevantes nas transições de fase são basicamente temperatura e pressão para os termotrópicos e temperatura, pressão e concentração para os liotrópicos (COWIE, 1991).

### 2.1.1 Cristais Líquidos Termotrópicos

São formados por substâncias orgânicas caracterizadas pela presença de anéis aromáticos ligados a grupos funcionais, podendo apresentar-se com forma alongada ou em forma de disco.

Os cristais líquidos termotrópicos são quimicamente estáveis sendo amplamente utilizados na indústria como por exemplo em dispositivos eletro-ópticos e sensores de temperatura.

Com base na geometria da molécula, os cristais líquidos termotrópicos são classificados em *cristais líquidos calamíticos*, quando a molécula assemelha-se ao formato de um bastão, e em *cristais líquidos discóticos*, quando a forma da molécula lembra a de um disco (Esquema 1).



Esquema 1 – a) molécula com formato de um bastão; b) molécula com a forma de um disco

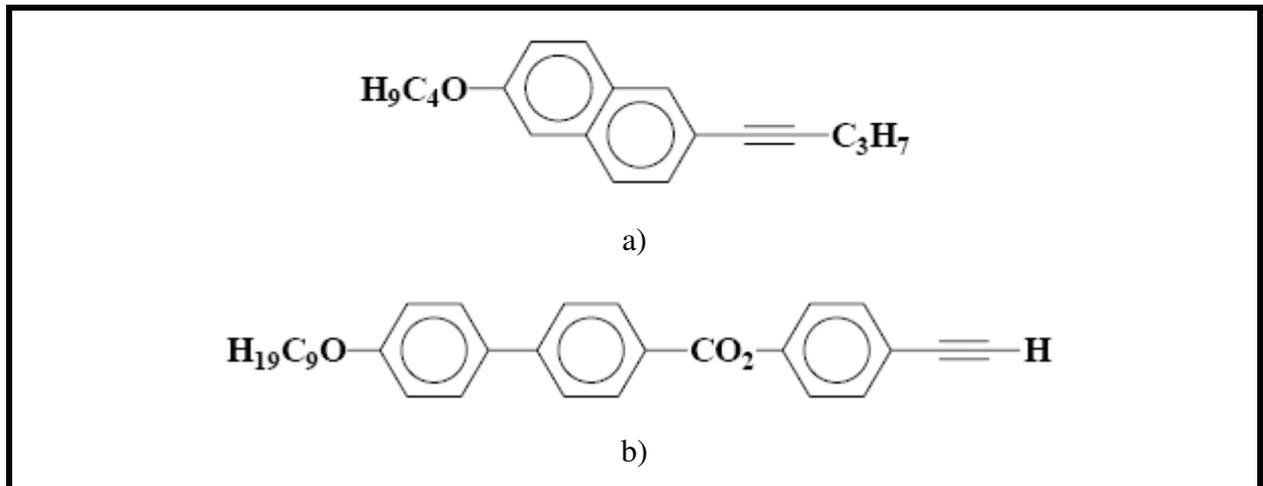
### 2.1.2 Cristais Líquidos Liotrópicos

São obtidos pela dissolução de moléculas anfifílicas em solventes adequados. As moléculas anfifílicas caracterizam-se por apresentarem uma parte polar hidrofílica (atraída pela água) e uma parte apolar hidrofóbica (não atraída pela água) constituída por uma cadeia carbônica. A partir de uma concentração denominada concentração micelar crítica, as moléculas se auto organizam compondo as micelas que são agregados com formato de esferas, bastões e discos.

Estes cristais líquidos são conhecidos por suas aplicações tecnológicas cosméticas, sabões, alimentos, detergentes e medicamentos.

### 2.1.3 Mesôgenos

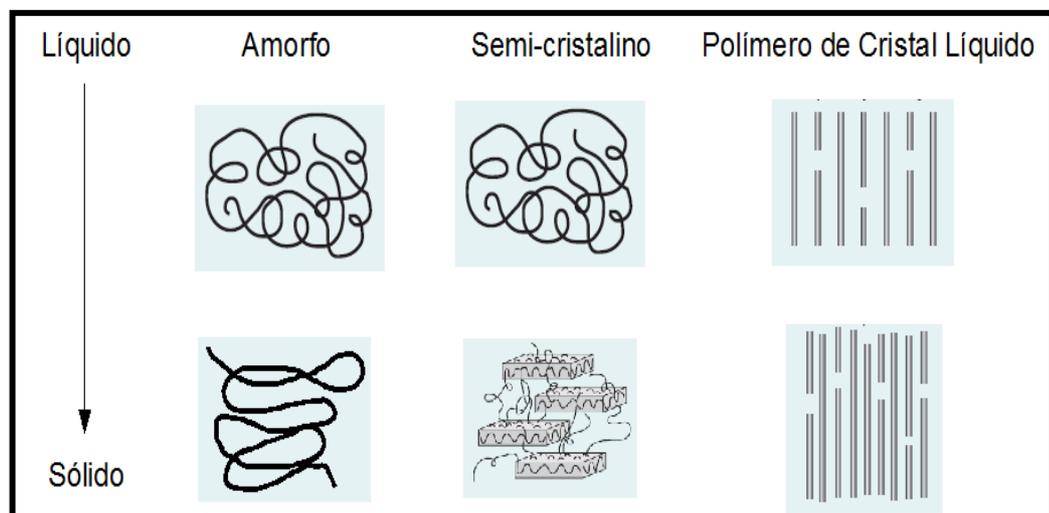
Mesôgenos são pequenas estruturas moleculares que formam cristais líquidos. No Esquema 2 são apresentadas as estruturas de dois mesôgenos.



Esquema 2. a) Estrutura do mesôgeno 2-butiloxi-6pent-1-inil-naftaleno, C 51,0 (N 23,0) I que apresenta mesomorfismo próximo à temperatura ambiente. b) Estrutura do mesôgeno 4-etinilfenil-4noniloxibifenalato, C 100 Sc 108 Sb 127 As 212 N 219 I.

### 2.2 POLÍMERO DE CRISTAL LÍQUIDO

Polímeros podem ser encontrados nos estados físicos fundidos e sólidos, e cada um destes dois estados pode ter suas cadeias poliméricas organizadas na estrutura amorfa semicristalina, e cristal líquido (Desenho 1) (CALLISTER, 2002).



Desenho 1 - Organização de cadeias poliméricas nos estados sólidos e líquidos.

Fonte: Callister, W. D. (2002, p.351)

Polímeros de cristal líquido são polímeros termoplásticos com cadeias de carbono e oxigênio. Estes polímeros fazem parte de um grupo de polímeros com uma capacidade de arranjo atômico repetido através de um alinhamento da cadeia molecular, ou de uma forma mais simples. Possuem cadeias de moléculas organizadas e alinhadas umas em relação às outras conforme Desenho 1. Estruturados desta forma não se encaixam nos formatos mais conhecidos de materiais poliméricos como os líquidos, os amorfos, os cristalinos e os semicristalinos.

### 2.2.1 Classificação dos Polímeros de Cristal Líquido

Baseados na orientação e no ordenamento posicional os polímeros de cristal líquido podem ser classificados em **esmético, nemático e colestérico** (TOQUER, 2008).

**Esmético:** pode surgir no formato cristalino ou também no formato de cristal líquido com a característica de alinhamento das moléculas ao longo de um eixo longo.

**Nemático:** esta classificação de polímero de cristal líquido tem a característica de se manter sólido à temperatura ambiente além de ter excelentes características de processamento, estabilidade térmica, resistência mecânica, resistência a chamas, inércia química a uma grande variedade de ácidos, solventes e alvejantes entre outros.

**Colestérico:** à temperatura ambiente são líquidos, transparentes e ópticamente anisotrópicos.

Comercialmente os polímeros de cristal líquido têm sido produzidos em escala industrial desde o início da década de 1980, com uma enorme gama de opções desde componentes elétricos como dispositivos de interconexão, carcaças de relés e capacitores, componentes automotivos como maçanetas e partes de painel até componentes para armazenamento e manipulação de produtos alimentícios como bandejas e formas para cozimento.

### 2.2.2 Polímeros de Cristal Líquido Comerciais

Comercialmente os polímeros de cristal líquido têm sido produzidos em escala industrial desde o início da década de 1980, com uma enorme gama de opções desde componentes elétricos como dispositivos de interconexão, carcaças de relés e capacitores, componentes automotivos como maçanetas e partes de painel até componentes para

armazenamento e manipulação de produtos alimentícios como bandejas e formas para cozimento.

Vectra® LCP constitui uma família de polímeros de cristal líquido fabricados pela Ticona.

Os diferentes tipos de Vectra® LCP são classificados de acordo com suas propriedades e agrupados em séries de acordo com o tipo de reforço e sua porcentagem. Estes reforços conferem ao polímero excelente desempenho em alta temperatura e boa rigidez (TICONA, 2001 b).

O polímero com reforço de fibra de vidro (série 100) tem boa resistência mecânica. Esta série tem polímeros com 15%, 30%, 40% ou 50% de fibra de vidro. O polímero de fibra de carbono (série 200) tem rigidez mais alta que o polímero de fibra de vidro, é condutor elétrico e tem 30% de fibra de carbono em sua composição. O polímero com combinações de fibras (série 400) é produzido com a combinação de várias fibras diferentes para uso em tecidos de elevada resistência. O polímero com reforço mineral (série 500) tem uma elevada resistência ao impacto, tem também a característica de produção de peças com bom acabamento. Utilizam-se cargas com 15%, 30%, 40% e 50% de reforço mineral. Os polímeros com fibras de grafite (série 600), tem uma grande capacidade de auto lubrificação e resistência química. Os polímeros das séries 700 e 800 têm reforços especiais para algumas utilizações específicas, como por exemplo, a série 700 tem reforço de negro de fumo que misturado com outras fibras como a de vidro ou grafite proporciona boa dissipação elétrica e a série 800, com reforços de fibra de vidro ou mineral tem uso em circuitos integrados entre outros usos na eletrônica (TICONA, 2001b).

### **2.2.3 Vectra E540i**

O polímero de cristal líquido denominado Vectra E540i, pertence à série 500 e tem 40% de carga mineral (Vectra E540i).

Segundo a Ticona, o Vectra E540i reforçado com carga mineral tem como principais características o baixo empenamento, fácil fluxo e aspecto superficial liso, além de ter (TICONA, 2008b; TICONA, 2008b1):

- Superfície antiaderente;
- Alta estabilidade térmica (até 280°C);
- Excelente resistência a agentes de limpeza;

- Alta rigidez e estabilidade dimensional;
- Boa fluidez para moldes complexos;
- Antichama inerente;
- Excelentes propriedades de barreira.

### 2.3 INDÚSTRIA DA PANIFICAÇÃO

O pão (Fotografias 1 e 2) como se conhece hoje surgiu a cerca de seis mil anos com os egípcios, que desenvolveram a técnica da fermentação, fator fundamental para se obter um pão leve e macio. Nesta época, para os egípcios, o pão tinha grande valor, não só na importância como alimento, mas era utilizado como moeda em transações comerciais de compra e venda ([www.abip.org.br/historiadopao.asp](http://www.abip.org.br/historiadopao.asp), 2008).

Desde então, diferentes povos vêm desenvolvendo vários sabores e receitas, tanto caseiras como nas chamadas indústrias de panificação. Na Europa o pão apareceu como resultado do comércio entre Egípcios e Gregos, e se difundiu por toda a Europa com a expansão do Império Romano ([www.abip.org.br/historiadopao.asp](http://www.abip.org.br/historiadopao.asp), 2008).



Fotografia 1 - Diferentes tipos de pães.



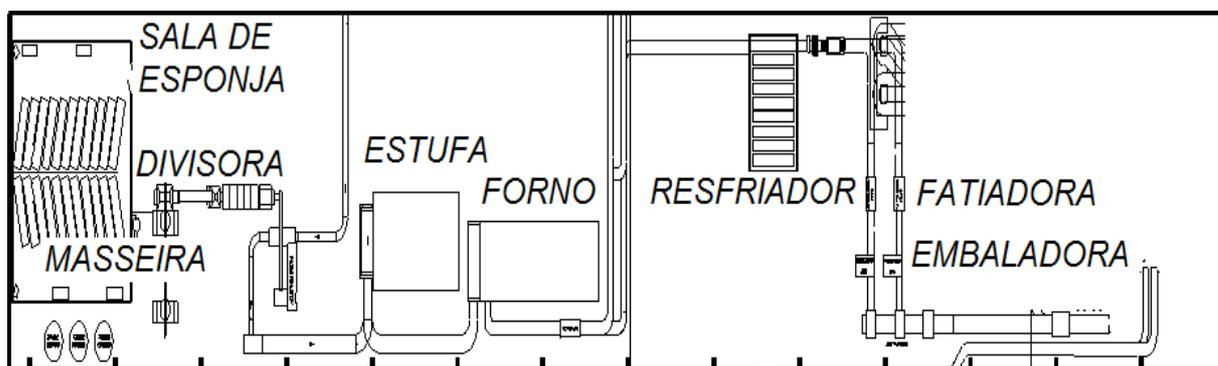
Fotografia 2 - Pão doce trançado.

No Brasil, o pão de trigo já era conhecido desde a colonização portuguesa, juntamente com outros produtos alimentícios oriundos da farinha de mandioca e o biju. Porém só houve uma expansão do consumo do pão através da colonização italiana no século 19 ([www.abip.org.br/historiadopao.asp](http://www.abip.org.br/historiadopao.asp), 2008).

### 2.3.1 Processo de Obtenção de Pães

Atualmente, o setor de Panificação conta com um grande número de indústrias de apoio, para desenvolvimento e confecção de equipamentos utilizados no processo de panificação, elevando a automação e controle das etapas do processo. Desde as primeiras etapas do processo em uma indústria de panificação, até a embalagem e expedição do produto para o cliente final, existe uma gama de tecnologias e de empresas especializadas em cada uma destas tecnologias.

Para melhor visualização dos equipamentos para processamento do Pão Tradicional Pullman - PP (código 9101), para o qual estão sendo desenvolvidas as formas de LCP, é apresentado no Esquema 1 um *Lay Out* dos equipamentos da linha de processamento deste produto e no Fluxograma 1 um fluxograma deste processo (BIMBO DO BRASIL, 2008).



Esquema 3 – Demonstrativo de linha de produção de pão de forma.

No Esquema 1 é demonstrado o posicionamento dos equipamentos em uma linha de produção de pães de formas, na fábrica da Bimbo do Brasil em São Paulo. O início do processo se dá nas *Masseiras* que são os equipamentos onde se realizam a homogeneização dos ingredientes líquidos e sólidos do produto. Após esta etapa o produto é enviado pela *Divisora*, onde é realizado o corte da massa de pão conforme o peso de cada tipo de produto, após isto, a massa é depositada nas formas e segue para o processo de

fermentação na *Estufa*, seguindo então para o *Forno* para cozimento. Após o *Forno*, os pães são retirados das formas por um processo de sucção em um equipamento denominado *Depanner*, neste momento as formas retornam para o início do processo para serem novamente abastecidas com massa crua. Os pães continuam o processo, em separado das formas em transportes, passando pelo *Resfriador* onde devem perder temperatura suficiente para serem fatiados e embalados respectivamente na *Fatiadora* e na *Embaladora*.

O Fluxograma 1 demonstra a seqüência das etapas do processo de produção de pão de forma do início na *Mistura* até o fim do processo no *Corte do produto em fatias* e na *Embalagem*.



Fluxograma 1 - Etapas do Processamento do Pão Tradicional Pullman - PP (9101)

Na Fotografia 3 pode ser visualizada a entrada do forno e na Fotografia 4 as formas sendo posicionadas na entrada do forno. Na Fotografia 5 pode ser visualizado o equipamento para retirada dos pães das formas por sucção (*Depanner*). Tanto o forno quanto o *Depanner* são equipamentos críticos para implementação das formas de Vectra E540i: o forno pelas elevadas temperaturas e o *Depanner* pela exigência de formas com características antiaderentes para facilitar a retirada do pão após o assamento.



Fotografia 3 – Sistema de entrada e saída do forno



Fotografia 4 - *Depanner*, equipamento localizado após o forno

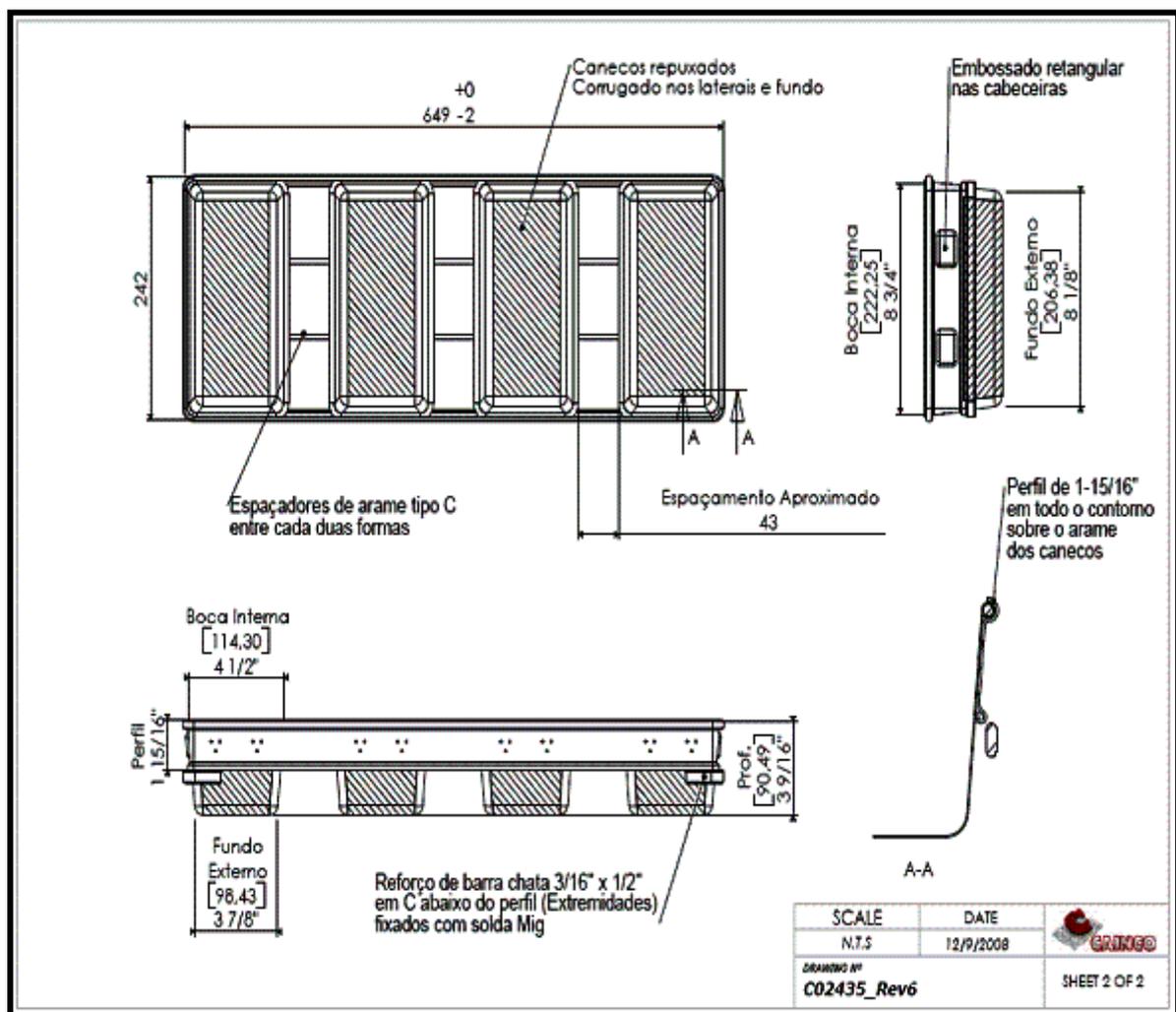


Fotografia 5 - *Depanner*, equipamento localizado após o forno

### 2.3.2 Formas Metálicas

As formas utilizadas atualmente nas indústrias de panificação são de aço carbono em conjuntos de canecos, que podem variar em número conforme o processo. O mais comum são conjuntos com quatro (Desenho 3) ou cinco canecos.

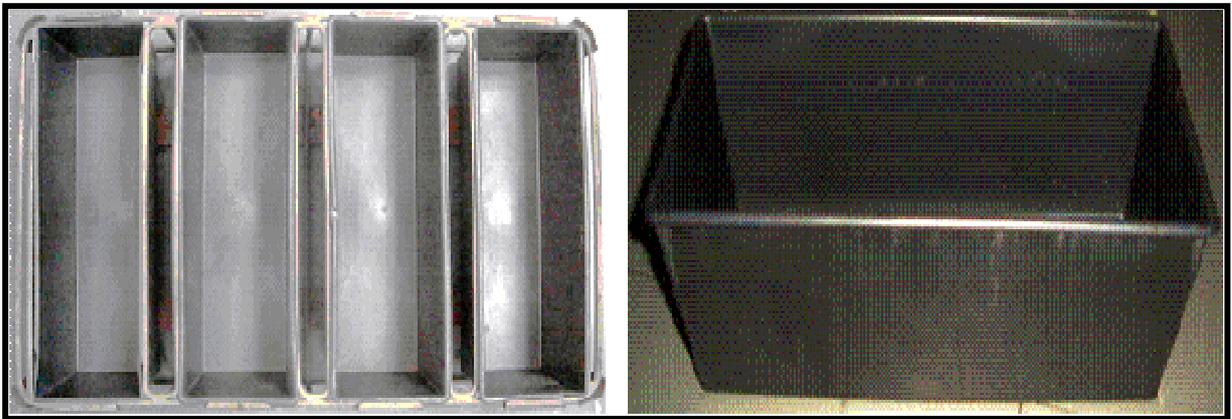
Para o processo do pão de forma do tipo “Pão Tradicional Pullman - PP” com código 9101, são utilizadas chapas de aço carbono com espessura de 0,6mm na confecção dos canecos e com largura total do conjunto para quatro canecos de 242 mm por 649 mm de comprimento (Desenho 3). O tratamento antiaderente é aplicado por empresas especializadas somente na parte interna dos canecos onde é depositada a massa crua para posterior fermentação e cozimento com a função de facilitar a retirada do pão após o forno de cozimento (BIMBO DO BRASIL, 2008)



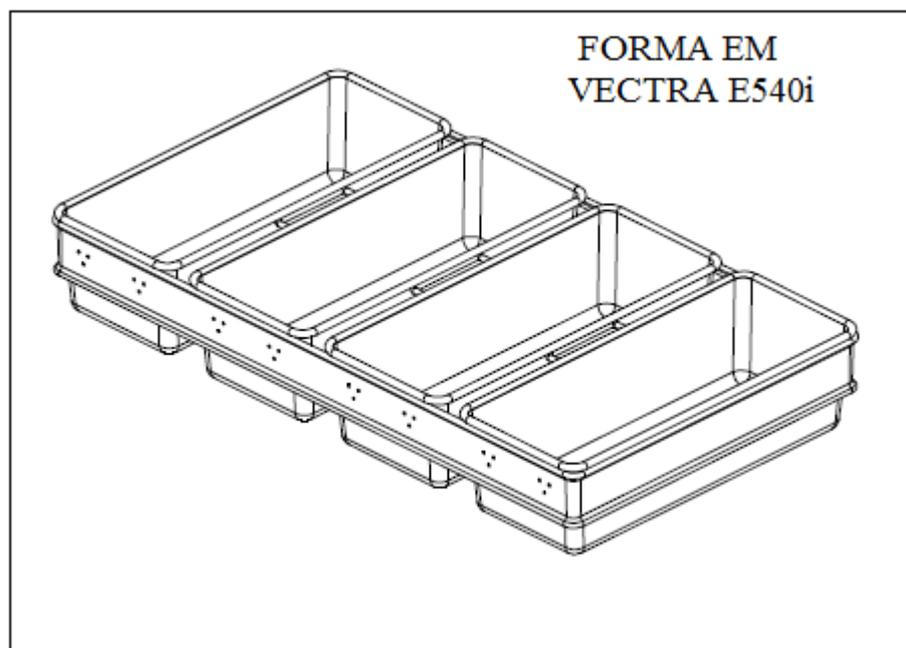
Desenho 3 - Projeto forma para Pão Integral. Fonte: Bimbo do Brasil

### 2.3.3 Formas de Vectra E540i

Para os ensaios práticos nas linhas de produção das fábricas da Bimbo do Brasil em São Paulo e em Mogi das Cruzes foram confeccionados conjuntos de formas ou canecos em material Vectra E540i com espessura de 2,3 mm (Fotografia 6). Foram também confeccionado suportes para conjuntos de quatro canecos (Desenho 4), alguns em aço 1020 e outros em aço inox, com dimensionais totais iguais aos conjuntos de aço já existentes, para que não fossem necessárias alterações nos equipamentos das linhas de produção onde seriam realizados os testes.



Fotografia 6 - Formas de Polímero de Cristal Líquido



Desenho 4 - Demonstrativo para Formas de PLC.

### 2.3.4 Custos

Empresas estão em constante busca por redução de custos fixos e variáveis, as empresas de panificação não fogem a esta regra. O custo de compra de formas de aço e principalmente de aplicação do revestimento antiaderente tem um peso considerável no custo fixo para a indústria de panificação. Cada forma tem uma vida útil de 10.000 ciclos de produção (3 anos a 3,5 anos) a um custo de R\$100,00 por conjunto de formas, (cada conjunto tem quatro formas). Durante estes ciclos é necessária a aplicação de camada antiaderente por quatro vezes (uma vez quando a forma é nova e outras três vezes no período de três anos) a um custo de R\$100,00 por conjunto de formas e por aplicação do antiaderente. Cada camada antiaderente tem duração entre oito meses e um ano. Em três anos, cada conjunto de formas custaria à Empresa, entre custo de fabricação com aplicação inicial de antiaderente e as três aplicações posteriores de antiaderente, R\$500,00. Considerando que são necessários 2.000 conjuntos de formas para um ciclo completo de produção, a empresa tem um custo total de R\$1.000.000,00 durante a vida útil das formas (BIMBO DO BRASIL, 2008).

Para as formas de polímero de cristal líquido não é necessário a utilização de tratamento antiaderente devido às características do material. Cada conjunto de quatro formas de polímero de cristal líquido tem um custo para a empresa de R\$140,00. Para cada conjunto de quatro formas é necessário uma armação de aço inox no valor de R\$300,00. As formas de polímero de cristal líquido têm uma vida útil teórica de 10.000 ciclos, gerando um custo total de R\$880.000,00 por três anos de uso relativo aos 10.000 ciclos, com uma economia de 12% em relação às formas de aço conforme pode ser verificado na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparativo entre custos das formas em aço carbono com tratamento antiaderente e formas de polímero de cristal líquido.

Formas	Custo do conjunto com 4 formas	Quantidade de conjuntos por linha	Custo Total
Aço carbono	R\$ 500,00	2000	R\$ 1.000.000,00
Vectra	R\$ 440,00	2000	R\$ 880.000,00

A Bimbo do Brasil na fábrica de São Paulo realiza um controle de vida útil das formas e da vida útil do tratamento antiaderente das mesmas através de uma planilha. A título ilustrativo, na Tabela 2 são apresentados parcialmente dados de uma planilha. Esta planilha é alimentada diariamente entre outras informações com a quantidade de produtos embalados, a

quantidade de inutilizados (produtos descartados por falhas no processo) em quilograma, em peças (unidade de pão) e número de ciclos que as formas realizam por dia. Um ciclo é a passagem de uma forma ou de um lote de formas por todos os equipamentos do processo retornando ao ponto inicial deste processo.

A vida útil do tratamento antiaderente é de aproximadamente 3.000 ciclos, garantido pela empresa que aplica este tratamento. O levantamento de informações sobre as condições do tratamento antiaderente é realizado de modo visual durante a produção, mais especificamente durante a retirada do pão das formas no *Depanner* (Fotografia 5). Se o antiaderente estiver comprometido, a retirada do pão da forma sofre falhas e uma parte dos pães não é retirada das formas por estar aderida a mesma. Outra maneira de levantar informação sobre as condições do tratamento antiaderente é a análise da planilha de controle de ciclos, quando o tratamento está danificado, a quantidade de produtos inutilizados aumenta. Com estes controles é possível conhecer o momento exato de realizar nova aplicação do tratamento antiaderente.

Tabela 2 – Controle de ciclos de formas. Fonte: Bimbo do Brasil, 2008

UM CICLO É IGUAL A: 1850 BANDEJAS		SITUAÇÃO DA GARANTIA DE CICLOS DAS FORMAS		Nº PEÇAS POR UNIDADE DE CICLO		7400		
TOTAL CAVIDADES DA FORMA: 4 CAVIDADES		-464,97		Nº PEÇAS POR CICLO REAL (PÇS EMBALADAS)		7400		
<b>CONTROLE DE CICLOS REAL DE FORMAS LINHA 2</b>								
LOTE SEMANA	DATA	QUANTIDADE EMBALADOS	QUANTIDADE DE APARAS KG	QUANTIDADE DE APARAS PÇS	QUANTIDADE INUTILIZADOS KG	QUANTIDADE INUTILIZADOS PÇS	QUANTIDADE TOTAL	CICLOS REAIS
2	02/01/08	91.925,00	0,000	0,00	1.313,980	2.561,36	94.486,36	12,77
2	03/01/08	113.936,00	0,000	0,00	142,590	277,95	114.213,95	15,43
2	04/01/08	90.413,00	0,000	0,00	330,020	643,31	91.056,31	12,30
2	05/01/08	80.671,00	0,000	0,00	2.582,160	5.033,45	85.704,45	11,58
2	07/01/08	88.298,00	0,000	0,00	746,360	1.454,89	89.752,89	12,13
2	08/01/08	61.195,00	0,000	0,00	65,040	126,78	61.321,78	8,29
3	09/01/08	111.920,00	0,000	0,00	2.494,240	4.062,07	116.702,07	15,70
3	10/01/08	119.782,00	0,000	0,00	2.452,420	4.780,55	124.562,55	16,83
3	11/01/08	96.007,00	0,000	0,00	4.305,030	8.391,87	104.398,87	14,11
3	12/01/08	126.445,00	0,000	0,00	2.253,720	4.393,22	130.838,22	17,68
3	14/01/08	80.538,00	0,000	0,00	5.482,710	10.687,54	91.225,54	12,33
3	15/01/08	67.483,00	0,000	0,00	2.712,210	5.286,96	72.719,96	9,83
4	16/01/08	106.225,00	0,000	0,00	3.023,570	5.903,65	112.128,65	15,15
4	17/01/08	113.892,00	0,000	0,00	1.407,960	2.744,56	116.636,56	15,76
40	26/09/08	103.024,00	0,000	0,00	1.989,000	3.877,19	106.901,19	
TOTAL DE CICLOS REAIS UTILIZADOS								3.464,97

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foi estudado o polímero de cristal líquido comercial, denominado Vectra® LCP, produzido pela companhia Ticona, a qual gentilmente doou material para que esta pesquisa pudesse ser desenvolvida.

#### 3.1 MATERIAIS

O material utilizado possui a referência Vectra E540i, no formato de corpos de prova para tração e impacto seguindo as normas ASTM D-638 e ASTM D-4812 respectivamente. A matéria prima para a composição final do Vectra E540i foi importada diretamente da Ticona nos Estados Unidos.

A composição química do Vectra E540i fornecida pela Ticona está especificada na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição percentual do VE E540i.

<b>Matéria-Prima</b>	<b>%</b>
<i>VE E950i RX NATURAL</i>	56
Talco	40
<i>VE LKX1231 BLACK</i>	4

Fonte: Ticona do Brasil.

Os reagentes usados para a obtenção do Vectra *VE E950i RX NATURAL* e do *VE LKX1231 BLACK* bem como sua composição percentual se encontram nas Tabelas 4 e 5 respectivamente.

Tabela 4 – Composição percentual do VE E950i RX NATURAL.

<b>Matéria Prima</b>	<b>%</b>
Ácido para-hidroxi-benzóico	33
Ácido 6-hidroxi-2-naftóico	4
44 BP (bis-fenol)	7
Ácido tereftálico	10
Anidrido acético	37
Trietileno glicol	4
Monoetileno glicol	5

Fonte: Ticona do Brasil.

Tabela 5 – Composição percentual do VE LKX1231 BLACK.

<b>Matéria Prima</b>	<b>%</b>
<i>VE E950i RX NATURAL</i>	80
<i>BLACK PEARLS 4750</i>	20

Fonte: Ticona do Brasil.

Para os ensaios químicos foram utilizados os seguintes reagentes marca Synth: ácido sulfúrico concentrado, acetato de etila, acetona, benzeno, clorofórmio, metanol, heptano e ácido acético glacial. Além destes também foram utilizados óleo de soja e água desmineralizada.

### 3.2 MÉTODOS

Neste item são apresentados os métodos utilizados na caracterização do polímero de cristal líquido (CANAVEROLO, 2004; MANO, 2001)

#### 3.2.1 Confeção dos Corpos de Prova

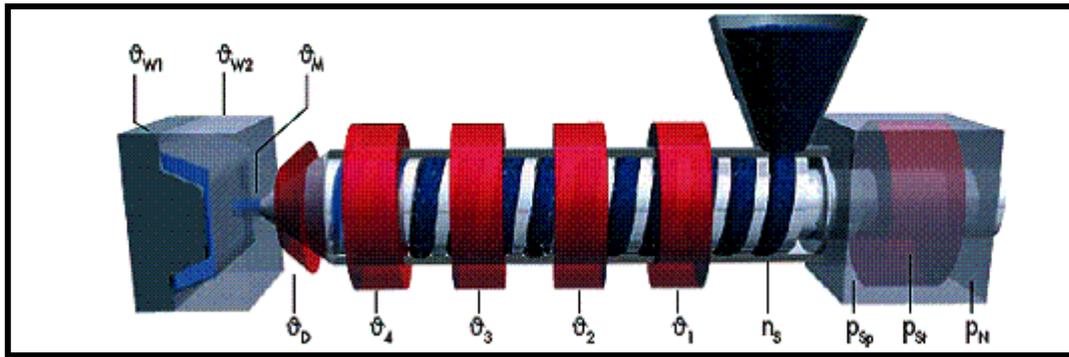
Os corpos de prova para os ensaios deste trabalho foram produzidos pela Ticona do Brasil na fábrica de Suzano, SP (TICONA, 2000; TICONA, 2002). Os materiais para composição final dos corpos de prova foram importados diretamente da Ticona nos Estados Unidos.

Os corpos de prova foram confeccionados segundo padrões produtivos específicos para o Vectra E540i (Quadro 1 e Desenho 5):

Pré-secagem da matéria prima	Sim
Temperatura do molde	Entre 80 e 120°C (v1 e v2)
Pressão de injeção	100 MPa
Velocidade de injeção	Entre 0,2 e 0,3 m/s
Tempo de residência	Entre três e cinco minutos
Temperaturas na rosca da extrusora	Entre 315°C (v1) no início da rosca e em 345°C (v4).

Quadro 1 - Condições para o processamento dos corpos de prova.

Fonte: Ticona do Brasil.

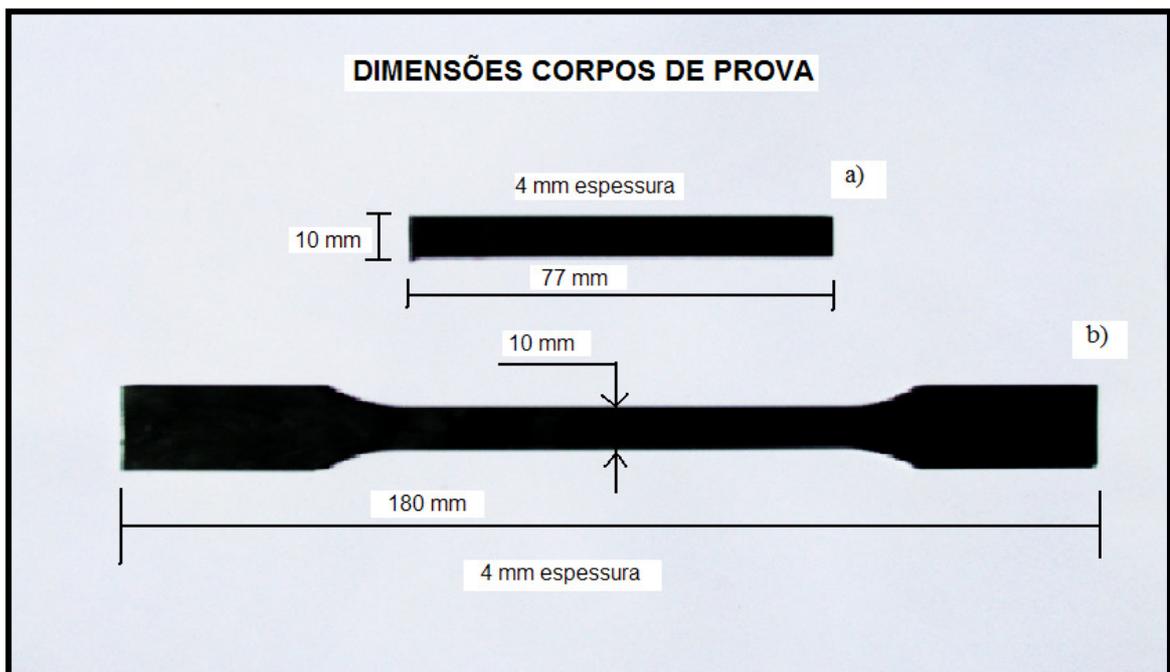


Desenho 5. Processamento do E540i durante a extrusão

Fonte: Ticona, 2000.

Foram confeccionados dois tipos de corpos de prova, um tipo para ensaios de tração segundo a norma ASTM D-638 e outro para ensaios de impacto ASTM D-4812. Estes corpos de prova e suas dimensões são apresentados na Fotografia 7.

Conforme os dimensionais, a norma D-638 especifica cinco tipos de corpos de prova: Tipos I, II, III, IV e V. A confecção dos corpos de prova utilizados nos ensaios baseou-se no Tipo II (Fotografia 7 b).



Fotografia 7 - Corpos de prova utilizados nos ensaios mecânicos. a) ensaios de impacto; b) ensaios de tração.

Os preparativos dos equipamentos utilizados para realizar os experimentos bem como a confecção dos corpos de prova de cada ensaio e o controle das condições de

laboratório descritos neste item foram realizados segundo normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) publicados na edição de 1997.

Tabela 6 – Ensaio realizados e as respectivas normas

ENSAIOS REALIZADOS	NORMA ASTM
Resistência à Tração (MPa)	D-638
Índice de Fluidez (g / 10 min.)	D-1238
Resistência ao Impacto (Izod) (J/m)	D-4812
Dureza Shore-D	D-2240
Distorção Térmica HDT (°C)	D-1525
Ponto de Amolecimento VICAT (°C)	D-648
Ultravioleta	D-2565 e G-154

### 3.2.2 Tratamento Térmico dos Corpos de Prova

Com o intuito de verificar o efeito da temperatura de trabalho nas propriedades mecânicas das formas de VECTRA E540i, corpos de prova foram submetidos a tratamento térmico nas temperaturas: 25°C, 212°C, 256°C, 270°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 800°C, 1000°C e 1200°C. O tempo de permanência em cada temperatura foi igual à uma hora.

Estas temperaturas foram escolhidas pelos motivos apresentados a seguir.

- a. 25°C - O ensaio foi realizado na temperatura ambiente para efeito comparativo com os outros ensaios em diferentes temperaturas;
- b. 212°C – Esta temperatura é inferior à temperatura de trabalho do forno; os corpos de prova foram submetidos a tratamento térmico nesta temperatura apenas para efeito comparativo com os outros ensaios em temperaturas mais altas;
- c. 256°C - Esta temperatura é igual à temperatura de trabalho do forno; Os corpos de prova foram submetidos a tratamento térmico nesta temperatura para verificar o comportamento da forma de polímero de cristal líquido nas condições de trabalho;
- d. 270°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 800°C e 1000°C - Os corpos de prova foram submetidos a tratamento térmico em diferentes temperaturas acima da temperatura de trabalho do forno, para avaliar a degradação do polímero e sua resistência em situações de superaquecimento do forno.

### 3.2.3 Ensaio Físico-Químicos

Para a caracterização físico-química foram realizados:

- a) ensaios preliminares para a determinação da composição química do Vectra E540i que serão comentados no subitem 4.2.1 e 4.2.2;
- b) ensaios com o objetivo de verificar a reatividade do Vectra E540i em diferentes ácidos, a solubilidade ou inchamento em solventes orgânicos e em água desmineralizada;
- c) ensaios para verificar a fusibilidade e a inflamabilidade do Vectra E540i.

#### 3.2.3.1 Ensaio Preliminares

Foi realizada a pirólise para verificação da presença de ácido carboxílico volátil. Uma pequena amostra de Vectra E540i foi queimada dentro de um tubo de ensaio e os vapores foram recolhidos sobre papel tornasol azul.

Para a verificação da presença de carga mineral e determinar sua porcentagem uma amostra, previamente pesada em balança analítica, foi queimada em uma mufla. A temperatura da queima foi 800°C. Após a queima a amostra foi novamente pesada e a porcentagem de carga determinada.

Também foi determinado o teor em sílica (SiO<sub>2</sub>) e cálcio na carga mineral.

#### 3.2.3.2 Reatividade, Solubilidade ou Inchamento do Vectra E540i

Os ensaios consistiram na imersão de corpos de prova, pesados previamente, nos seguintes reagentes de marca Synth: ácido sulfúrico concentrado e soluções diluídas (80%, 60%, 40% e 20%) a fim de se verificar o efeito da acidez nas amostras. O tempo de imersão para verificação dos resultados foi de 10 minutos, 24 horas e 7 dias.

Corpos de prova pesados previamente foram imersos nos solventes orgânicos: acetato de etila, acetona, benzeno, clorofórmio, metanol, heptano e ácido acético glacial. Além destes solventes também foram utilizados óleo de soja e água desmineralizada. O tempo de imersão para verificação dos resultados foi de 10 minutos, 24 horas e 7 dias. Após cada tempo de imersão, a aparência visual do líquido foi anotada e em seguida os corpos de prova foram retirados do solvente, secos e pesados para verificar perda ou aumento de massa.

### 3.2.3.3 Fusibilidade e Inflamabilidade do Vectra E540i

Para verificar a fusibilidade, alguns fragmentos de Vectra foram colocados dentro de um tubo de ensaio levado à chama de um bico de Bunsen. Durante o aquecimento foi observado o comportamento do material, isto é, se amolecia aderindo à parede do tubo (fusível e termoplástico) ou se formava um resíduo sólido negro (infusível e termorrígido).

A inflamabilidade foi determinada expondo fragmentos de Vectra à chama do bico de Bunsen por alguns segundos. Se após a remoção da chama a amostra continua queimando com chama, o material é inflamável, caso contrário é auto-extinguível.

### 3.2.4 Resistência à Degradação por Radiação Ultravioleta

Este ensaio teve por objetivo a análise dos efeitos da exposição prolongada de corpos de prova a radiação Ultravioleta.

O Ensaio Ultravioleta foi realizado segundo a norma ASTM G-154 e consistiu na exposição de corpos de prova à incidência de raios Ultravioleta de lâmpadas fluorescentes UVA. Com esta exposição é possível simular as condições do ambiente que o material estará exposto quando em condições normais de trabalho na forma de produto final.

Para o presente estudo o resultado do ensaio se deu por análise visual e comparativa entre corpos de prova que não haviam sido expostos ao Ultravioleta e corpos de prova que foram expostos ao Ultravioleta. Também foram realizados ensaios de impacto e de tração com os corpos de prova que foram expostos ao Ultravioleta nos diferentes períodos.

#### 3.2.4.1 Condições para o Ensaio

A norma ASTM G-154 não especifica condições de controle do ambiente do laboratório para o Ensaio de Ultravioleta, porém para os ensaios de tração e impacto, após o ensaio de Ultravioleta, as condições de temperatura e umidade do laboratório estavam de acordo com a norma ASTM D-638, que especifica temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar de  $50 \pm 5\%$ .

#### 3.2.4.2 Preparação das Amostras

As amostras utilizadas neste ensaio foram produzidas de acordo com as normas ASTM D-638 e D-4812 respectivamente específicas para ensaios de tração e impacto. Para cada tempo de permanência na câmara de Ultravioleta foram separados cinco corpos de prova do Vectra E540i, por norma.

#### 3.2.4.3 Execução do Ensaio

A exposição artificial das amostras foi feita numa câmara de envelhecimento da marca Q-Lab que utiliza lâmpadas fluorescentes UVA, com controle de radiação, temperatura e ambiente de condensação. O ciclo definido da câmara foi de: 8 horas sob luz UV em 60°C e 4h sem luz em condensação a 50°C. A intensidade de radiação que alcança a superfície das amostras é de  $0,89\text{Wm}^{-2}$ , seguindo a norma ASTM G-154.

Os corpos de prova foram expostos à radiação de luz Ultravioleta por 30, 45 e 80 dias. Ao final de cada ensaio foi realizada uma inspeção visual.

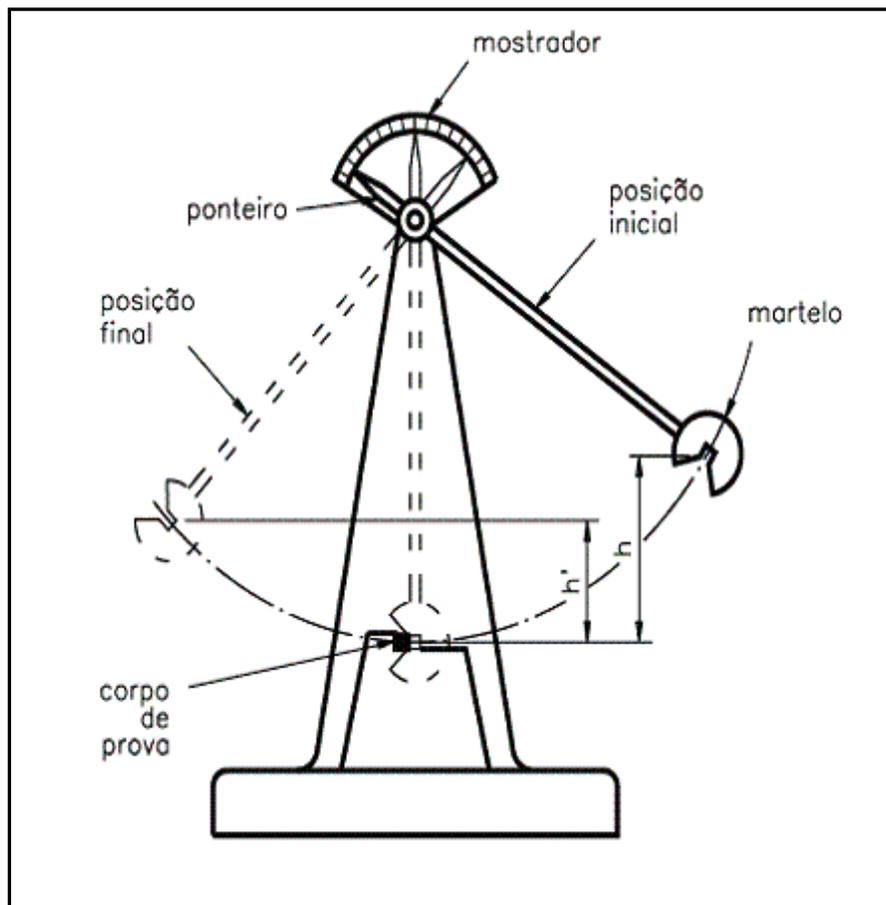
Após a inspeção visual os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração e impacto.

### 3.2.5 Ensaio de Resistência ao Impacto (Izod)

Os Ensaios de Resistência ao Impacto foram realizados segundo a norma ASTM D-4812, uma normalização específica para materiais plásticos com a característica de utilizar corpos de prova sem entalhe e posicionados na vertical no equipamento de ensaio.

Este ensaio tem por objetivo a análise da resistência ao impacto dos corpos de prova do Vectra E540i através da aplicação de uma força brusca e repentina e do uso de carga dinâmica. O resultado da força do impacto e da velocidade de deslocamento da carga dinâmica aplicadas ao pendulo é a energia. Tendo em vista que o pendulo continua seu deslocamento após romper com o corpo de prova até o ponto final da trajetória, o resultado obtido é a energia final (Desenho 6). Subtraindo a energia final pela energia inicial, ou energia potencial, valor conhecido ( $E_p = m \times g \times h = \text{massa} \times \text{aceleração da gravidade} \times \text{altura}$ ), obtém-se a energia absorvida pelo corpo de prova.

O equipamento Tinius Olsen Modelo 92T, foi o equipamento utilizado para os ensaios de Impacto. Com sistema de impacto Modelo 892, com visor digital onde são visualizados os resultados dos testes, este sistema permite também a transferência dos dados para um microcomputador em forma de relatório com informações individuais por corpo de prova de Energia (J) e Resistência ao Impacto ( $\text{kJ/m}^2$ ). O desenho 6 apresenta um esquema demonstrativo do equipamento utilizado no teste de impacto.



Desenho 6 - Demonstrativo de equipamento para ensaio de resistência ao impacto  
Fonte: American Society for Testing and Materials (1997, pág. 195).

### 3.2.5.1 Preparação das Amostras

Para este ensaio, foram separados dez corpos de prova, a norma recomenda um mínimo de cinco amostras e preferencialmente dez amostras. Após as medições das espessuras de cada um dos corpos de prova, utilizando paquímetro digital, as informações foram armazenadas no computador, através do programa da Tinius Olsen e para posterior cálculo de energia e tensão. Segundo a norma ASTM D-4812, os corpos de prova devem ter

espessura abaixo de 12,7 mm. Nos corpos de prova deste ensaio a menor espessura foi de 4,02 mm e a maior espessura foi de 4,13 mm.

### 3.2.5.2 Condições para o Ensaio

As condições de temperatura e umidade do laboratório para a realização do ensaio estavam de acordo com a norma ASTM D-4812, que especifica temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar de  $50 \pm 5\%$ . Estas condições são suficientes para que os corpos de prova tenham uma estabilidade térmica suficiente, regularização e confiabilidade dos resultados.

### 3.2.5.3 Execução do Ensaio

Realizou-se um ensaio preliminar com uma amostra para verificação das condições gerais do equipamento (Fotografia 8), este resultado não foi computado no resultado final dos ensaios.



Fotografia 8 – Equipamento Tinius Olsen Modelo 92T

### 3.2.6 Ensaio de Tração

Os Ensaios de Tração foram realizados segundo a norma ASTM D-638, uma normatização específica para materiais plásticos com reforço ou sem reforço. O ensaio tem que ser realizado em condições controladas de temperatura, umidade e velocidade do equipamento de tração. Os métodos que abrangem a norma D-638 são cinco, Tipos I, II, III, IV e V, dependendo do dimensional de cada corpo de prova, da forma construtiva do corpo de prova (filme, placa ou moldado) e do material de fabricação dos corpos de prova (plástico rígido, semi-rígido, filme ou plástico com componentes de reforço). Os ensaios com o E540i foram realizados de acordo com o Tipo II, por se tratar de um material reforçado com carga mineral e com espessura de 4 mm por 180 mm de comprimento, portanto com características compatíveis com este método.

O equipamento para os ensaios de tração foi o Q-Test, com duas hastes de fixação dos corpos de prova, a haste inferior fixa e a haste superior móvel (Fotografia 9).



Fotografia 9 – Equipamento para ensaio de tração Q-Test

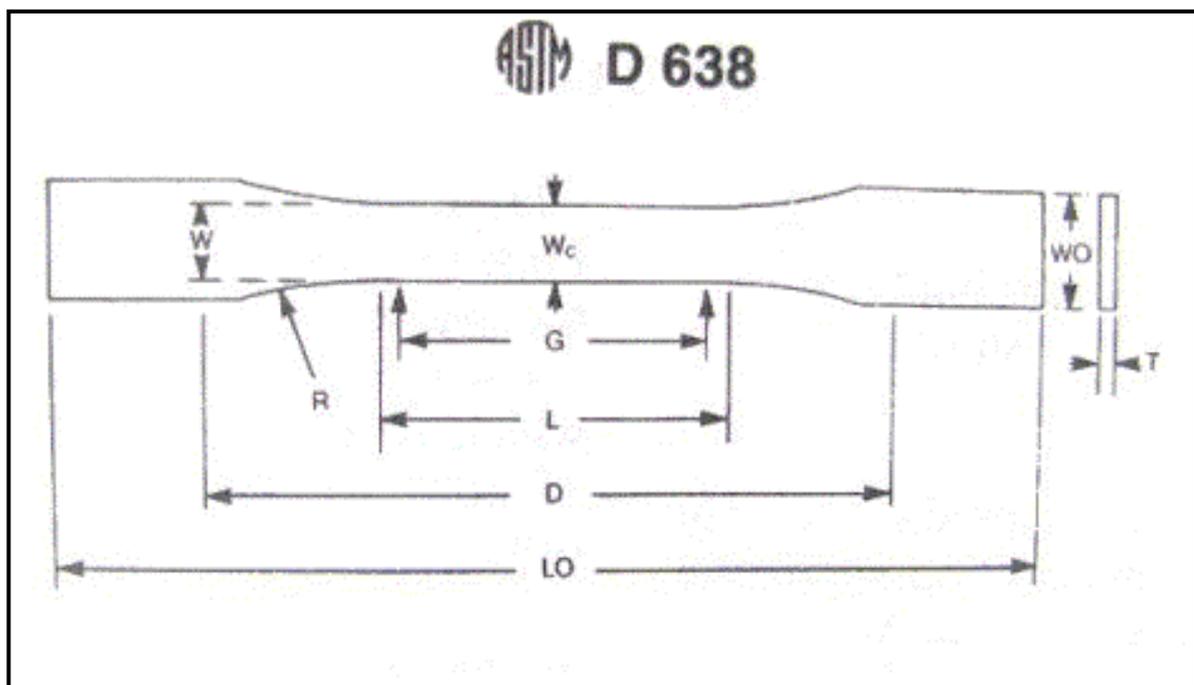
Este ensaio tem por objetivo verificar a deformação de um corpo de prova quando sujeito a aplicação de cargas em sentido axial nas duas extremidades do corpo de prova.

Neste trabalho foram analisados os resultados de ensaios de tração em corpos de prova após exposição a diferentes temperaturas (25°C, 212°C, 270°C e 300°C).

Foram analisados os resultados de deformação final (%) e tensão máxima e módulo de elasticidade dos corpos de prova (MPa). A tensão ( $\sigma$ ) corresponde à força (F) dividida pela área da seção (A) do corpo de prova.

### 3.2.6.1 Preparação das Amostras

Na preparação das amostras, de acordo com a norma D-638, foram separados sete corpos de prova por temperatura. Foram realizadas as medições de espessura (T), com média de 4,10 mm, e largura de cada um dos corpos de prova na secção central ( $W_c$ ), com média de 10,13 mm, utilizando um paquímetro digital (Desenho 7). As informações foram armazenadas em um microcomputador conectado ao equipamento para ensaio de tração Q-Test (Fotografia 8).



Desenho 7. Corpo de prova para tração.

Fonte: American Society for Testing and Materials (1997, pág. 46)

### 3.2.6.2 Condições para o Ensaio

As condições de temperatura e umidade do laboratório para a realização do ensaio estavam de acordo com a norma ASTM D-638, que especifica temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar de  $50 \pm 5\%$ . Estas condições são suficientes para que os corpos de prova tenham uma estabilidade térmica suficiente regularização e confiabilidade dos resultados.

### 3.2.6.3 Execução do Ensaio

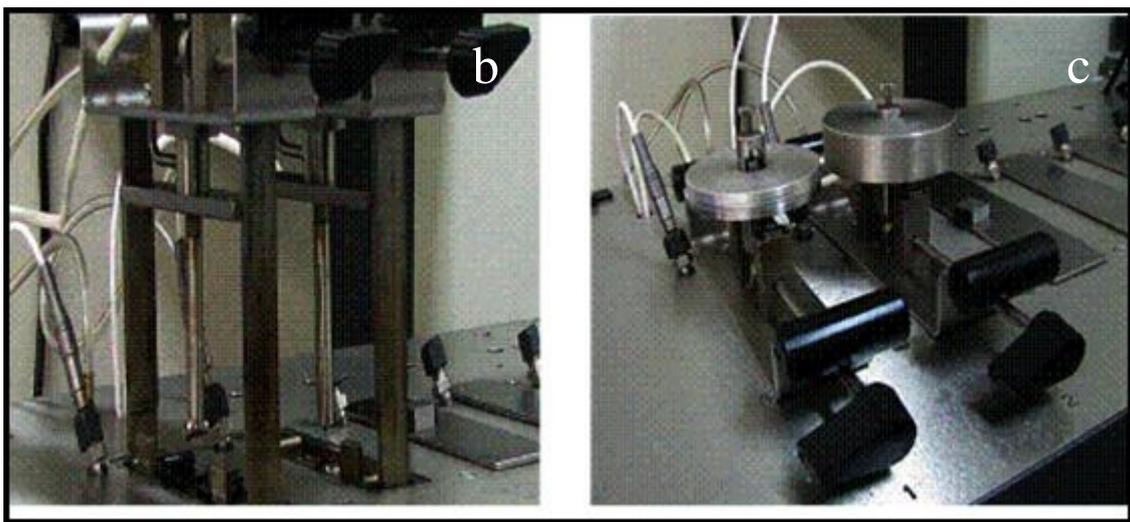
Realizou-se um ensaio exploratório para definir as condições gerais do equipamento. O resultado deste ensaio não foi computado no resultado final dos ensaios. Embora os corpos de prova tivessem sido fixados ao centro das garras e estas respeitassem a norma ASTM D-638, que orienta para que o espaço entre as serras das garras seja de ao menos 2,4mm e com ao menos 1,6mm de profundidade, verificou-se a necessidade de uma fixação extra das hastes das garras para não haver escorregamento destas com os corpos de prova, devido a grande resistência do Vectra E540i. Esta fixação extra se deu através de elásticos presos a “sargentos” fixados à estrutura das garras que tracionavam as hastes das garras elevando a pressão das garras nos corpos de prova evitando desta forma escorregamentos. Para cada temperatura do tratamento térmico a que foram submetidos, ( $25^\circ\text{C}$ ,  $212^\circ\text{C}$ ,  $270^\circ\text{C}$  e  $300^\circ\text{C}$ ) foram ensaiados sete corpos de prova.

### **3.2.7 Temperatura de Distorção Térmica – HDT ( $^\circ\text{C}$ ) e Ponto de Amolecimento – VICAT ( $^\circ\text{C}$ ).**

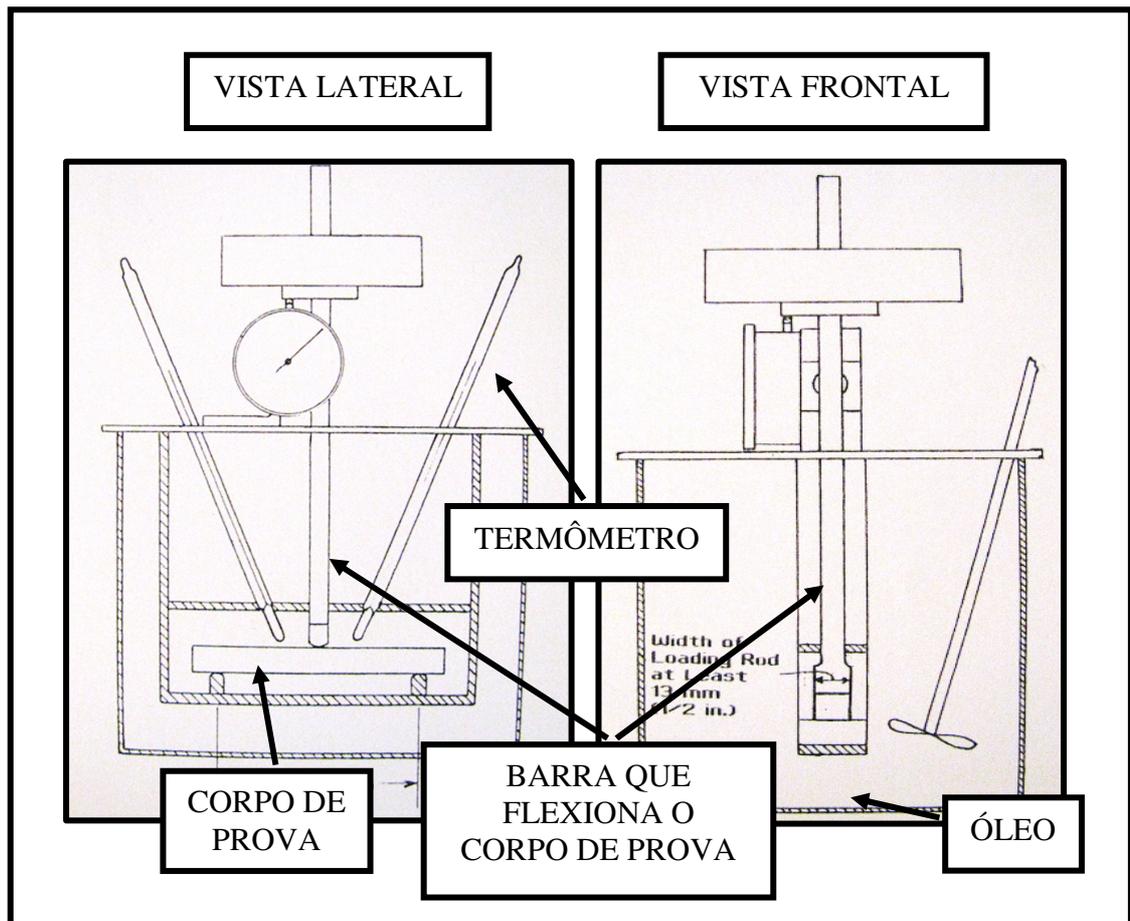
A caracterização térmica do Vectra E540i foi realizada por meio de ensaios de temperatura de distorção térmica HDT (ASTM D-1525) e Ponto de Amolecimento VICAT (ASTM D-648). Estes ensaios permitem determinar respectivamente a que temperatura um material plástico, submetido a cargas conhecidas, sofre deformações por flexão e a que temperatura se dá a penetração de uma agulha em um corpo de prova até a profundidade de 1 mm.

Os Ensaio de Temperatura de distorção térmica e ponto de amolecimento VICAT têm ambos por objetivo à caracterização térmica de um material submetido a uma

determinada carga. Estes ensaios foram realizados com corpos de prova no formato para Teste de Impacto. O HDT consistiu na aplicação de uma carga no centro do corpo de prova através de um bastão metálico de ponta arredondada. Quando o corpo de prova através da aplicação da carga sofrer uma flexão de 0,250 mm é então verificado a temperatura em que ocorre esta flexão. O ensaio VICAT é realizado com a aplicação de uma agulha metálica no corpo de prova, quando a agulha penetrar 1 mm no material é então verificado a que temperatura se deu esta penetração. Os ensaios foram realizados no (Fotografia 10 e Desenho 8).



Fotografia 10 - Equipamento Tinius Olsen modelo HD94/398, a) Vista geral do Equipamento Tinius Olsen, b) Equipamento antes do ensaio, c) Equipamento durante o ensaio.



Desenho 8 - Equipamento para Caracterização Térmica, HDT.  
 Fonte: American Society for Testing and Materials (1997, pág. 58)

### 3.2.7.1 Condições para o Ensaio

As condições de temperatura e umidade do laboratório para a realização do ensaio estavam de acordo com a norma ASTM D-648, que especifica temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar de  $50 \pm 5\%$ . Estas condições são suficientes para que os corpos de prova tenham uma estabilidade térmica suficiente regularização e confiabilidade dos resultados.

### 3.2.7.2 Preparação das Amostras

Para o ensaio Vicat, a norma ASTM D-648 determina que o corpo de prova tenha ao menos 3 mm de espessura. O corpo de prova utilizado neste ensaio foi confeccionado com os dimensionais de 77 mm de comprimento por 10 mm de largura e 4 mm

de espessura (Fotografia 7). Segundo esta norma, o ensaio é realizado com uma só barra retangular e não há resultado com média de medições.

### 3.2.7.3 Execução do Ensaio

Para o ensaio HDT, o corpo de prova foi posicionado horizontalmente sobre o equipamento. A amostra foi então submersa em óleo, no reservatório do Equipamento Tinius Olsen, que tem a função de um meio de transferência de calor. O óleo foi aquecido a uma velocidade de 3°C por minuto. Foi então aplicada uma carga de 237 gramas, através de um bastão metálico de ponta em formato cilíndrico, fotografia 10, ao centro da amostra para se conseguir a máxima tensão do material até que o corpo de prova sofresse uma flexão de 0,250 mm.

O ensaio VICAT até certo ponto segue um processo semelhante ao ensaio HDT. O corpo de prova foi posicionado horizontalmente sobre o equipamento, que foi então submerso em óleo, que foi por sua vez aquecido a uma velocidade de 3°C por minuto. Foi então aplicada uma carga de 4.000 gramas ao centro da amostra. O objetivo neste ensaio não é flexionar o corpo de prova. O bastão metálico neste ensaio tem a ponta em formato de agulha e com a pressão da carga de 4.000 gramas aplicada ao centro da amostra, a agulha penetra no material. Quando esta penetração atinge a profundidade de 1 mm é verificada a temperatura do óleo do reservatório do equipamento Tinius Olsen, que por efeito de transferência de calor, conhece-se a temperatura do corpo de prova nas condições de penetração de 1,000 mm.

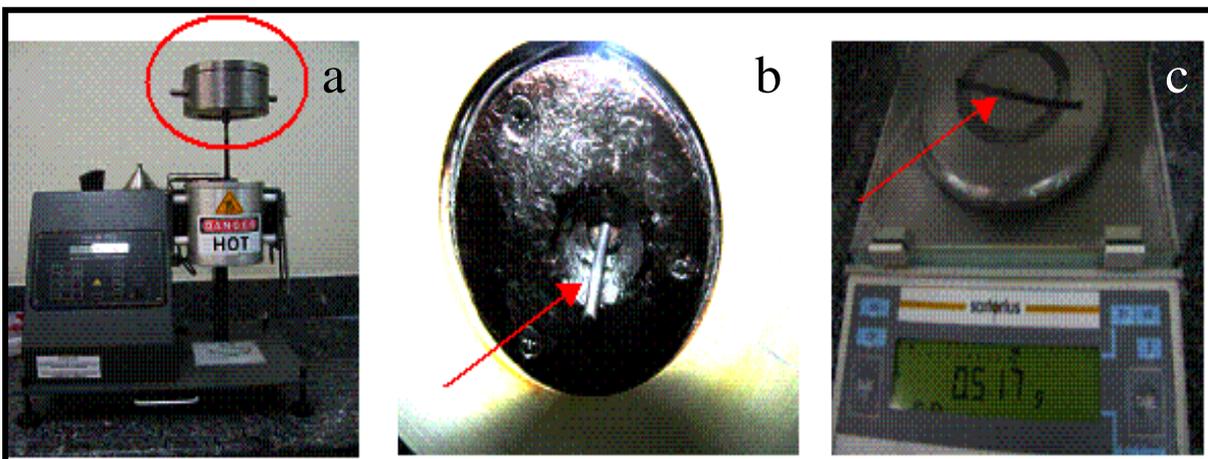
### 3.2.8 Índice de Fluidez

Índice de Fluidez é um ensaio realizado segundo a norma ASTM D-1238, uma normalização específica para materiais plásticos e consiste na medição de quantidade de material no estado líquido em gramas por 10 minutos de escoamento através de um orifício em equipamento próprio para medição de escoamento líquido.

A norma ASTM D-1238 especifica dois procedimentos diferentes para este ensaio, o Procedimento A, tem uma operação e controles de tempo manual, e o Procedimento B, que tem operação e controle de tempo automático. Para cada um a norma especifica procedimentos diferentes. Para o ensaio em questão foi utilizado o Procedimento A, este

procedimento especifica que haja valores de massa entre 0,15 gramas e 50 gramas por 10 minutos de fluxo de material.

Os ensaios de Índice de Fluidez foram realizados em Equipamento Tinius Olsen modelo MP993, segunda a norma ASTM D-1238 (Fotografia 11).



Fotografia 11 – a) posicionamento dos pesos de apoio; b) material saindo pelo orifício de escoamento; c) processo de pesagem das amostras.

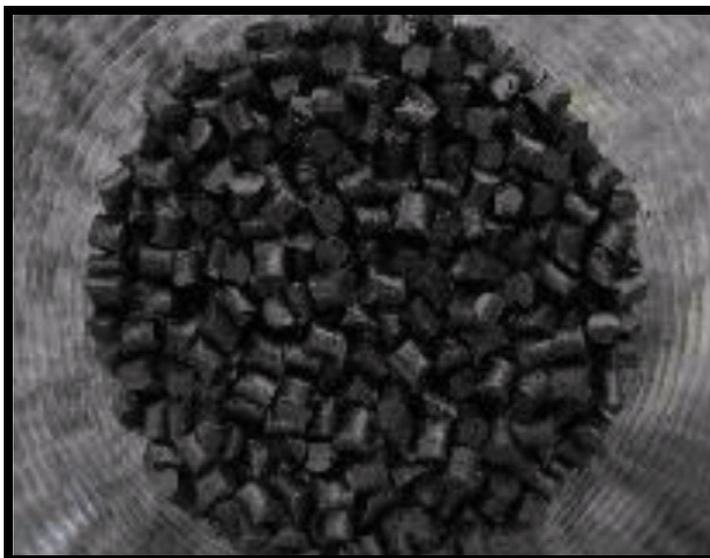
### 3.2.8.1 Descrição do equipamento

Neste equipamento a amostra é depositada num reservatório aquecido onde é realizada a transformação desta do estado sólido para o estado fundido. O equipamento ainda tem um sistema de compressão do material com adição de pesos que tem a função de forçar o escoamento do fluxo líquido. A quantidade destes pesos consta de tabelas para diferentes materiais poliméricos. Este sistema é constituído de um pistão metálico de 50,8 mm de diâmetro e 162 mm de comprimento e de superfície totalmente lisa. O escoamento do fluxo acontece através de um orifício na base do reservatório de aquecimento, com diâmetro de  $9,5504 \pm 0,0076$  mm.

### 3.2.8.2 Execução do Ensaio

As amostras em pequenas porções (Fotografia 12) foram inseridas no reservatório de aquecimento e a fusão do material ocorreu à temperatura de 320°C. Para proporcionar o escoamento do material foram utilizados dois pesos de apoio, totalizando 12.400 gramas posicionados sobre o pistão. A escolha da quantidade de peso utilizado neste ensaio se deu através de testes, com a elevação gradual da carga até que o fluxo do material se desse de forma constante. Este procedimento de escolha da quantidade de peso foi necessário

uma vez que o Vectra E540i, não está incluído nas tabelas da norma ASTM D-1238. Foram retiradas nove amostras de escoamento a cada 15 segundos por amostra. As amostras foram pesadas em uma balança de precisão.



Fotografia 12 - Amostras Vectra E540i para ensaio de fluidez

### 3.2.9 Ensaio de Dureza Shore-D

Este ensaio teve por objetivo a medição da dureza em corpos de prova submetidos a tratamentos térmicos que simularam a temperatura de trabalho do forno de pão na fábrica do produto Pullman em São Paulo, que é de 256°C. Para efeito de comparação, também foram realizados ensaios de dureza em corpos de prova com tratamento térmico acima da temperatura de trabalho do forno (300°C), com tratamento térmico abaixo da temperatura de trabalho do forno (212°C) e por último foram realizados ensaios de dureza em corpos que não foram submetidos a tratamento térmico.

O sistema de dureza Shore consiste em um endentador, espécie de pulsômetro, com ponta esférica ou cônica, que recebe a pressão de uma mola calibrada (Fotografia 13). A consequência da pressão do sistema no corpo de prova é uma perfuração com a profundidade desta perfuração sendo medida através de um sistema de escalas. O ensaio de dureza Shore é realizado através da norma ASTM D-2240.

Para cada escala de ensaio Shore existem diferentes durômetros, com diferentes pressões de molas e diferentes atuadores. Os testes de dureza segundo a norma D-2240 são realizados com durômetros dos tipos Shore A, B, C, D, DO, O e OO conforme o

tipo de material ensaiado e sua dureza. Para os ensaios em borrachas, elastômeros, termoplásticos e plásticos duros é usual trabalhar com os durômetros tipos Shore A ou D, A para materiais mais moles e D para materiais mais duros.



Fotografia 13 – Sistema para ensaio de dureza Shore

#### 3.2.9.1 Condições para o Ensaio

Os ensaios foram realizados seguindo a norma ASTM D-618, conforme orientação da norma ASTM D-2240. A temperatura deve estar em  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar de  $50 \pm 5\%$ . Estas condições são suficientes para que os corpos de prova tenham uma estabilidade térmica suficiente, regularização e confiabilidade dos resultados.

#### 3.2.9.2 Preparação das Amostras

Os corpos de prova utilizados neste ensaio foram produzidos segundo a norma para ensaio de Resistência ao Impacto, com 77 mm de comprimento por 10 mm de largura e 4 mm de espessura e com uma superfície sem rugosidades.

### 3.2.9.3 Execução do Ensaio

As amostras foram posicionadas na horizontal e o indutor estava a 12 mm da amostra em uma posição vertical. Conforme estabelece a norma ASTM D-2240 em cada uma das sete amostras foram realizados de três a cinco medições, com ao menos 6 mm de distância entre cada medição, fazendo média destas medições para definição da dureza de cada amostra.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos subitens 4.1 a 4.8 são apresentados e discutidos os resultados após tratamento térmico, os ensaios físico-químicos, os ensaios de degradação a radiação Ultravioleta e os ensaios mecânicos.

### 4.1 RESISTÊNCIA A TRATAMENTO TÉRMICO

Os corpos de prova submetidos a tratamento térmico nas temperaturas 212°C e 256°C não apresentaram alterações que fossem visíveis a olho nu como: mudança de cor, presença de bolhas e deformação por fusão.

Observou-se, a 300°C, a formação de bolhas de diferentes proporções, conforme observado na Fotografia 14.



Fotografia 14 - Corpo de prova com tratamento térmico de 300°C

Verificou-se também que algumas bolhas apresentavam pequenas trincas, outras estavam parcialmente furadas e a maioria tinha baixa resistência a esforços mecânicos, podendo ser vazadas com estilete.

Na Fotografia 15 é apresentado um corpo de prova com bolha vazada usando estilete e na Fotografia 16 é possível ver o detalhe da região desta bolha.

O tratamento térmico a 300°C foi repetido várias vezes, não havendo alteração no comportamento observado nas Fotografias 14 a 16. Como nesta temperatura não há decomposição da carga mineral (talco), a formação de bolhas sugere a degradação do polímero com formação de frações voláteis. Dada a característica lamelar do polímero, estes gases se alojariam entre as lamelas deslocando-as, o que justificaria o destacamento por placas observado nas Fotografias 15 e 16. Outra possibilidade de formação de bolhas seria

devido às falhas de processamento na etapa de pré-secagem da matéria-prima havendo água retida nos corpos de prova injetados.



Fotografia 15 - Corpo de prova após tratamento térmico a 300°C.



Fotografia 16 - Detalhe da região da bolha mostrada na Fotografia 12.

Como todos os corpos de prova ensaiados eram provenientes de um mesmo lote fornecido pela Ticona, não foi possível comprovar ou rejeitar esta última hipótese de formação de bolha.

Após aquecimento a 400°C, os corpos de prova tinham o aspecto de uma massa fundida (Fotografia 17). Este resultado era esperado já que a temperatura de fusão do VECTRA E540i é igual a 335°C (Ticona, 2009).

A 400°C os corpos de prova apresentavam aparência compacta e brilhante conforme pode ser observado na Fotografia 17. À medida que a temperatura do tratamento térmico foi aumentada, os corpos de prova foram perdendo massa, transformando-se em um pó com tonalidades que variaram de cinza escuro a branco.



Fotografia 17 - Corpo de prova a 400°C.

Nas Fotografias 18 a 20 estão apresentados 3 corpos de prova calcinados em cadinho de porcelana, nas temperaturas de 500 e 600°C. A formação do pó, com o aumento da temperatura, indica que houve degradação do polímero e a coloração branca revela a presença da carga mineral, o talco (GREENWOOD, 1994).

Para a determinação da porcentagem de carga mineral, fragmentos de Vectra foram calcinados a 800°C, obtendo-se uma perda de massa (matéria orgânica) igual a 61%.



Fotografia 18 - Corpo de prova a 500°C



Fotografia 19 - Corpo de prova a 500°C



Fotografia 20 - Corpo de prova a 600°C

O tratamento térmico a 800°C foi repetido por 4 vezes, confirmando-se a presença de 39% de resíduo e 61% de voláteis. Estes dados estão bem próximos da especificação para o VECTRA E540i, fornecido pela Ticona (40% de carga mineral). O mesmo resultado foi verificado a 1000°C.

#### 4.2 ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS

Devido ao sigilo de patente, a única informação que se tinha a respeito da composição do Vectra E540i era que a mesma continha 40% de carga mineral e 60% de polímero de cristal líquido, mas a composição química tanto do polímero como da carga mineral era desconhecida.

Em virtude do exposto acima, após a comprovação destas porcentagens (conforme citado no item 4.1), antes de se prosseguir a caracterização físico-química do material, realizou-se uma análise química que pudesse esclarecer a composição química do polímero e da carga mineral, apesar de não ser o escopo desta dissertação.

Nos subitens 4.2.1 e 4.2.2 estão apresentados e comentados os resultados desta análise química. Nos subitens 4.2.3 a 4.2.6 estão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios físico-químicos.

#### 4.2.1 Composição Química do Polímero

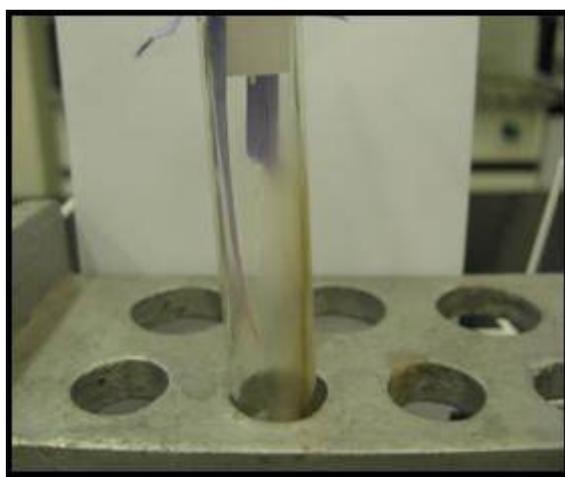
Por meio de uma pirólise foi possível verificar a presença de ácido carboxílico.

Esta pirólise consistiu no aquecimento gradativo, com bico de Bunsen, de fragmentos de uma amostra de Vectra E540i com a produção de vapores de coloração final amarela acastanhado.

Os vapores ao entrarem em contato com papel tornasol azul, umidificado, o tingiram de rosa confirmando assim a presença de ácidos carboxílicos voláteis (Fotografias 21 e 22).



Fotografia 21 – Pirólise do Vectra E540i



Fotografia 22 – Pirólise do Vectra E540i:  
verificação de vapores ácidos

Para a determinação da provável composição do polímero, tentou-se realizar uma análise por meio da espectroscopia na região do infravermelho. Entretanto, esta análise não pode ser realizada devido à dificuldade em se obter um filme suficientemente fino que pudesse ser analisado por transmissão.

Os ensaios para a determinação da composição química não foram continuados em virtude da Ticona do Brasil ter autorizado o fornecimento da provável composição química do Vectra E540i (conforme citado nas Tabelas 3 a 5).

#### **4.2.2 Composição da Carga Mineral**

Uma análise qualitativa prévia do resíduo de calcinação a 1000°C permitiu verificar a presença de sílica, magnésio, cálcio e sódio.

Para a determinação quantitativa da sílica ( $\text{SiO}_2$ ), o resíduo da calcinação foi atacado com ácido fluorídrico concentrado.

As análises por espectroscopia de absorção atômica e ataque do resíduo com ácido fluorídrico concentrado indicaram um teor máximo de 60% de  $\text{SiO}_2$ , indicando a presença de talco (Gaia Campos, 2001) como carga mineral.

Estes resultados foram confirmados pelos dados da composição do Vectra E540i fornecida pela Ticona.

#### **4.2.3 Fusibilidade**

Durante o aquecimento do tubo de ensaio contendo pedaços de Vectra E540i observou-se o amolecimento do material e sua aderência na parede do tubo (Fotografia 21, apresentada na página 37).

Estas evidências indicam material fusível e, portanto presença de um polímero termoplástico na composição do polímero comercial Vectra E540i.

#### **4.2.4 Inflamabilidade**

Ao entrar em contato com uma chama, o Vectra E540i queima.

Esta queima ocorre com formação de chama amarela, e quando a fonte é removida esta chama se apaga espontaneamente.

Este comportamento pode ser observado nas Fotografias 23 e 24. A Fotografia 23 representa a condição do material imediatamente após a retirada da chama do bico de

Bunsen e subsequente, na Fotografia 24, o material já está apagado. Por meio da Fotografia 23, observa-se que o material apresenta uma região em brasa e ainda queima com chama, porém por poucos segundos. A presença de brasa pode ser devida ao negro de fumo que apresenta combustão sem chama.



Fotografia 23 – Ensaio de inflamabilidade  
Queima logo após a retirada do bico de Bunsen



Fotografia 24 – Ensaio de inflamabilidade Ausência da fonte de chama  
Material apagado

O ensaio para a determinação da inflamabilidade do Vectra E540i permitiu verificar que o mesmo é auto extingüível de acordo com os boletins técnicos da Ticona (Ticona, 2009).

#### 4.2.5 Solubilidade e Inchamento

A solubilidade e o inchamento do Vectra E540i foram determinados em 8 diferentes tipos de solventes orgânicos. Após 90 dias de imersão em cada um destes solventes, verificou-se que não houve perda de massa dos corpos de prova e nem mudança de coloração do solvente. Também não se observou aumento da massa dos corpos de prova. Estes resultados estão resumidos nos Quadros 2 e 3.

Solvente	Solubilidade após 7 dias	Solubilidade após 90 dias
Acetato de etila	Nenhuma	Nenhuma
Propanona	Nenhuma	Nenhuma
Triclorometano (Clorofórmio)	Nenhuma	Nenhuma
Etanol	Nenhuma	Nenhuma
Heptano	Nenhuma	Nenhuma
Benzeno	Nenhuma	Nenhuma
Ácido etanóico	Nenhuma	Nenhuma
Óleo de soja	Nenhuma	Nenhuma

Quadro 2 – Solubilidade em diversos solventes orgânicos.

Solvente	Inchamento após 7 dias	Inchamento após 90 dias
Acetato de etila	Nenhum	Nenhum
Propanona	Nenhum	Nenhum
Triclorometano (Clorofórmio)	Nenhum	Nenhum
Etanol	Nenhum	Nenhum
Heptano	Nenhum	Nenhum
Benzeno	Nenhum	Nenhum
Ácido etanóico	Nenhum	Nenhum
Óleo de soja	Nenhum	Nenhum

Quadro 3 – Inchamento em diversos solventes orgânicos.

Os corpos de prova deixados em óleo de soja, durante 120 dias, não apresentaram alteração visível e nem houve mudanças no aspecto do óleo. Em água desmineralizada, também não houve perda ou aumento de massa dos corpos de prova e nem alteração visual como pode ser verificado na Fotografia 25 e nos Quadros 4 e 5.



Fotografia 25 – Corpo de prova do Vectra E540i em H<sub>2</sub>O desmineralizada, após 400 dias.

Solvente	Solubilidade		
	7 dias	90 dias	400 dias
H <sub>2</sub> O	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma

Quadro 4 – Solubilidade em água desmineralizada.

Solvente	Inchamento		
	7 dias	90 dias	400 dias
H <sub>2</sub> O	Nenhum	Nenhum	Nenhum

Quadro 5 – Inchamento em água desmineralizada.

Estes ensaios químicos foram importantes, pois confirmaram a ausência de interação do Vectra E540i com os solventes utilizados, podendo as formas de pães entrarem em contato com estes materiais na higienização durante o processo industrial.

#### 4.2.6 Reatividade em Ácido Sulfúrico

O ataque com ácido sulfúrico foi realizado nas concentrações 20%, 40%, 60%, 80% e 98% e na temperatura ambiente. Nas Fotografias 26 a 29 podem ser visualizados os corpos de prova logo após imersão nas soluções 40%, 60%, 80% e 98%.



Fotografia 26 – Corpo de prova em H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 40 %, logo após imersão



Fotografia 27 – Corpo de prova em H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 60 %, logo após imersão



Fotografia 28 – Corpo de prova em H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 80 %, logo após imersão

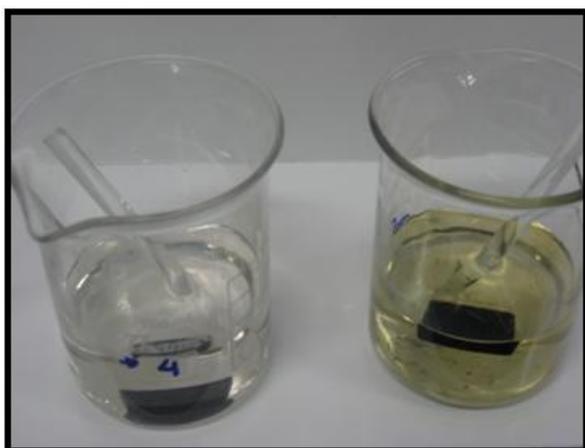


Fotografia 29 – Corpo de prova em H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 98 %, logo após imersão

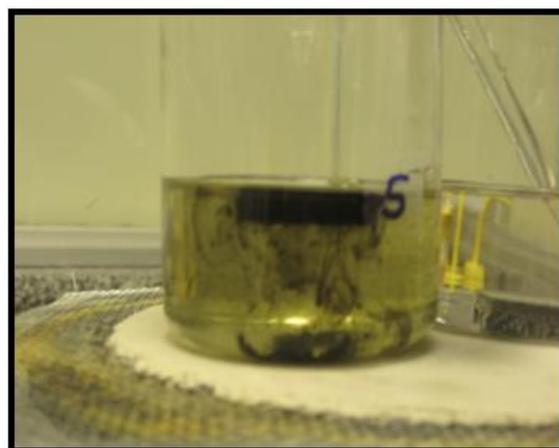
Nota-se que todas as a solução estavam límpidas e incolores salvo a solução a 98 % que tinha coloração amarelada (Fotografia 29 e 30). Antes do aquecimento, a solução a 98% também apresentava uma massa preta proveniente do corpo de prova (Fotografia 31).

Todas as soluções foram aquecidas, permanecendo inalterados os resultados obtidos com as três primeiras concentrações (20, 40 e 60%). A solução 80% adquiriu uma tonalidade amarelada e na solução 98% houve carbonização total (Fotografia 32).

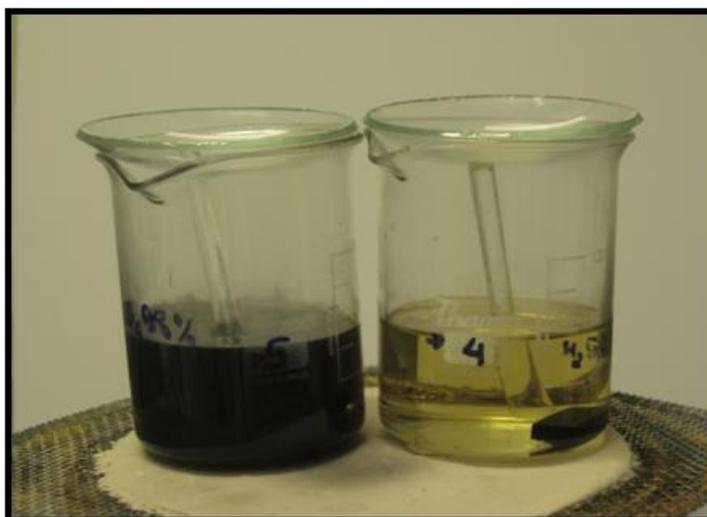
As amostras foram deixadas à temperatura ambiente e em repouso por 24 horas. Nestas condições não houve modificações visíveis em todas as soluções. Após sete dias de permanência no ácido os resultados permaneceram inalterados.



Fotografia 30 – Corpos de prova no início da imersão em  $\text{H}_2\text{SO}_4$  80% (4) e 98% (5)



Fotografia 31 – Corpo de prova após 1 hora: imersão em  $\text{H}_2\text{SO}_4$  98%.



Fotografia 32 – Corpos de prova após 7 dias: imersão em  $\text{H}_2\text{SO}_4$  80% (4) e 98%

#### 4.3 ENSAIO DE DEGRADAÇÃO AO ULTRAVIOLETA (UV)

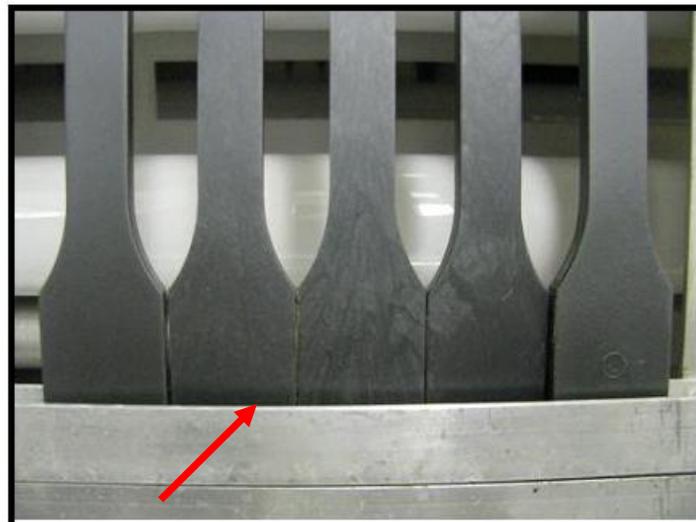
Aos 30 dias de permanência na câmara foi realizada uma inspeção visual, em que se constatou ligeira alteração na tonalidade da cor entre as áreas expostas ao UV e as duas

extremidades dos corpos de prova que tiveram a radiação UV bloqueada pela estrutura do equipamento onde estavam apoiados (Fotografias 33 e 34). A região exposta ao UV ficou mais escura que as extremidades dos corpos de prova, conforme Fotografia 35. Após as exposições nos períodos de 45 dias e 80 dias, a diferença nas tonalidades aumentou (Fotografia 36).

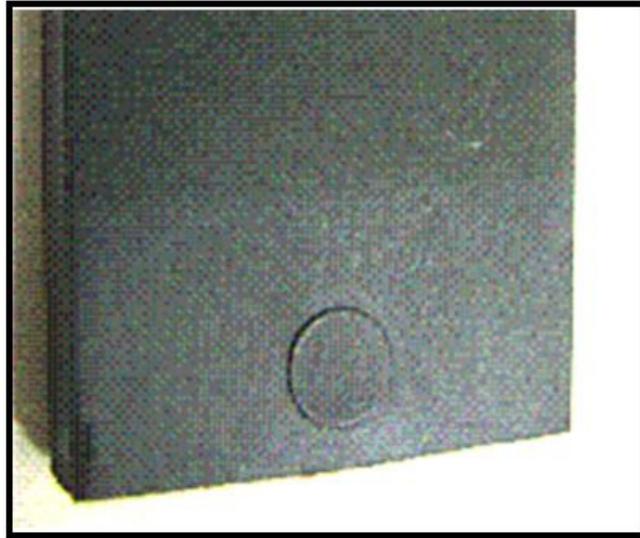


Fotografia 33 - Posicionamento dos corpos de prova no equipamento para ensaio de radiação Ultravioleta. Extremidade inferior dos corpos de prova apoiada no equipamento.

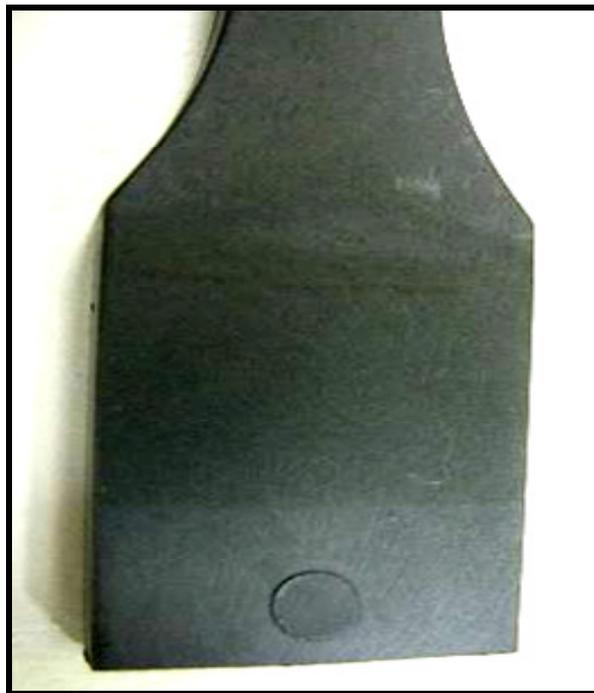
Não houve, porém outros sinais de degradação visíveis a olho nu. A superfície dos corpos de prova permaneceu sem irregularidades, com aparência lisa.



Fotografia 34 – Detalhamento do posicionamento dos corpos de prova no equipamento para ensaio de radiação Ultravioleta. Extremidade inferior dos corpos de prova apoiada no equipamento.



Fotografia 35. Diferença de coloração do corpo de prova após ensaio UV.  
Na região apoiada no equipamento, a cor é mais clara.



Fotografia 36 – Diferença na coloração entre a região exposta à radiação UV e a região apoiada no equipamento.

#### 4.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO (Izod)

Ao final dos ensaios de impacto, o equipamento Tinius Olsen emitiu um relatório em formato de arquivo eletrônico. Através desse relatório foi possível obter a tensão de cisalhamento. Na Tabela 7 é apresentado o resultado obtido nos ensaios e o resultado

apresentado na literatura para comparação, obtido no endereço eletrônico da Empresa Ticona ([www.ticona.com](http://www.ticona.com)).

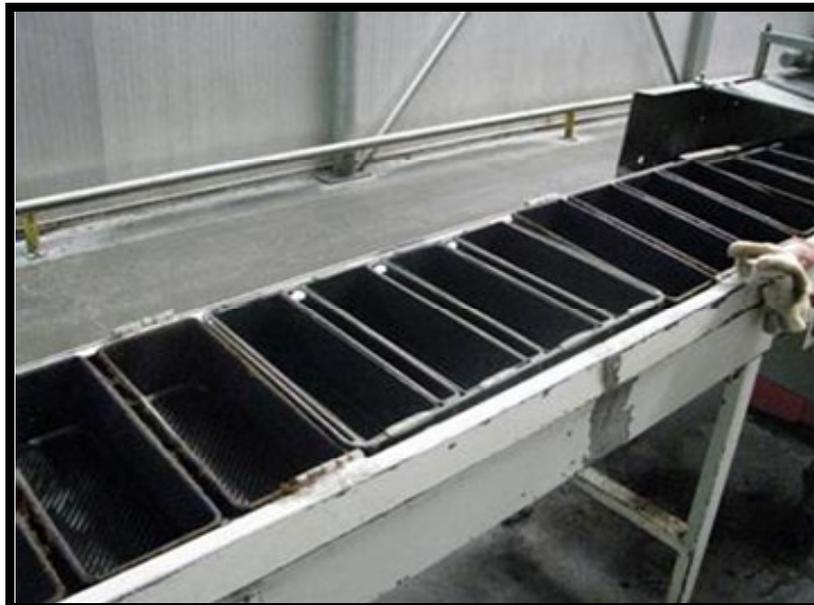
Tabela 7 – Ensaio de Resistência ao Impacto

Resultados	Tensão (kJ/m <sup>2</sup> )	Norma
Este trabalho	25,6 ± 3,5	ASTM D-4812
Literatura*	35	ISO 180/1U

\*[http://www.ticona.com/index/products/liquid\\_crystal/home.htm](http://www.ticona.com/index/products/liquid_crystal/home.htm)

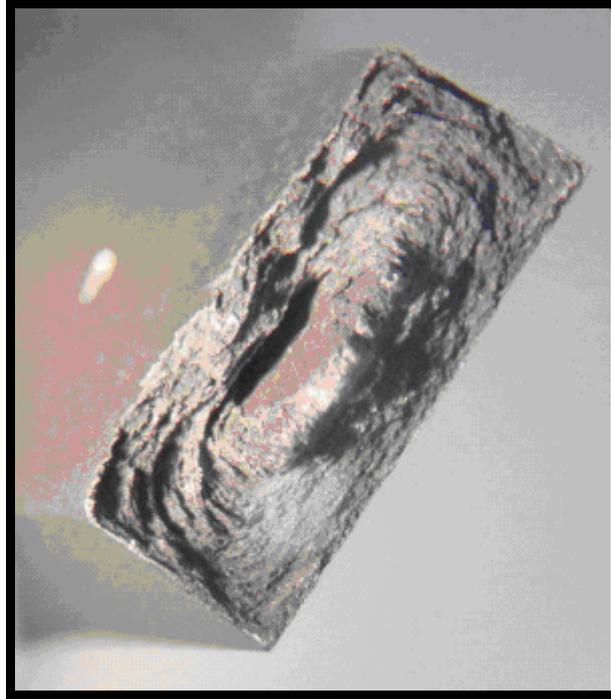
O conhecimento da resistência ao impacto é muito importante, pois o processo industrial de produção de pães provoca grandes esforços mecânicos às formas de pães nas diferentes etapas de um ciclo produtivo isto é: no transporte de formas (Fotografia 37), na estufa, no forno, no *Depanner*, entre outros equipamentos. As formas se chocam entre si e/ou com partes dos equipamentos por onde são transportadas. Ter um produto com boa resistência ao impacto é importante para que se possa chegar aos dez mil ciclos, conforme estimativa da Ticona.

A diferença no valor de resistência ao impacto publicado no site da Ticona e o valor obtido para este trabalho podem ser atribuídos às diferenças nas porcentagens de carga mineral e no processamento do material utilizado para obtenção dos corpos de prova.



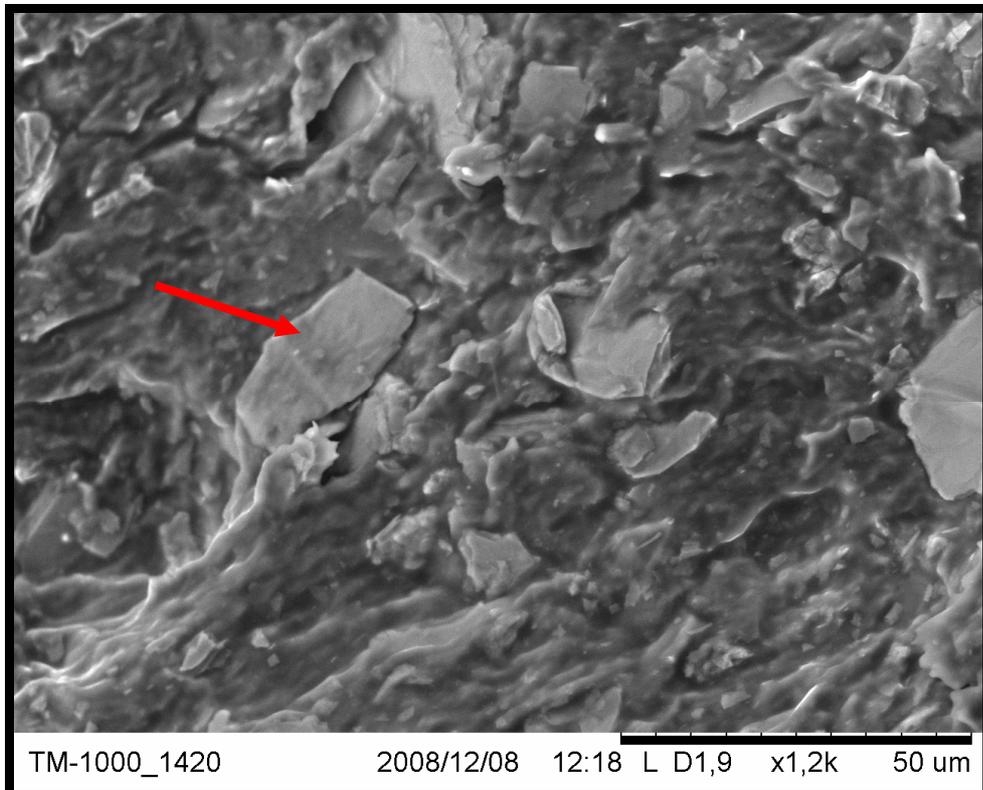
Fotografia 37 - Transporte de formas antes de carregar com massa de pão.

Na Fotografia 38, é possível verificar o aspecto da fratura e a estrutura em camadas característica dos polímeros de cristal líquido nemáticos.



Fotografia 38 - Aspecto da fratura após o ensaio.

Na Micrografia 1, é possível visualizar as partículas de talco na forma de lâminas delgadas ou lamelas adquiridas durante as etapas de cominuição da rocha original.



Micrografia 1 – Caracterização do Vectra E540i por microscopia eletrônica de varredura. Presença de talco.

#### 4.5 ENSAIO DE DUREZA SHORE-D

O Gráfico 1 demonstra a queda brusca da dureza do Vectra E540i após o ensaio com corpos de prova submetidos a tratamento térmico a 212°C, 256°C e 300°C, passando de uma dureza média (Shore D) igual a  $83,93 \pm 0,53$  à temperatura ambiente para uma dureza média de  $64,86 \pm 3,35$  a 300°C (Tabela 8 e Gráfico 1).

Também foram realizados ensaios de dureza após tratamento térmico em outras temperaturas (265°C, 275°C e 290°C) verificando-se que o ponto crítico é em 275°C, isto é, a dureza do Vectra E540i se mantém constante até esta temperatura.

Nas temperaturas altas (acima de 270°C), a formação de bolhas dificultou muito as medidas e sugere que o desvio nos valores obtidos possa ser devido à colocação da ponta do durômetro em regiões onde havia micro bolhas que não eram visíveis a olho nu ou sobre macro bolhas que se rompiam (Fotografias 14 a 16).

De acordo com os resultados, a exposição em temperaturas acima de 270°C não é aconselhável, pois nas regiões onde há formação de bolhas a dureza é bem menor. Assim as formas para assamento de pães poderão apresentar problemas como rompimento das bolhas ou da própria forma caso haja aumento de temperatura do forno acima de 270°C.

Tabela 8 – Resultados ensaio de Dureza Shore D

AMOSTRA	TEMPERATURA AMBIENTE (25°C)	212°C	256°C	300°C
1	84,50	84,00	84,00	69,00
2	84,00	83,50	83,00	63,00
3	84,00	84,50	83,50	62,00
4	84,50	84,50	84,50	64,50
5	83,50	84,50	83,00	70,00
6	84,00	84,50	84,00	64,00
7	83,00	84,00	83,50	61,50
MÉDIA	83,93	84,21	83,64	64,86
DESVIO PADRÃO	$\pm 0,53$	$\pm 0,39$	$\pm 0,56$	$\pm 3,35$

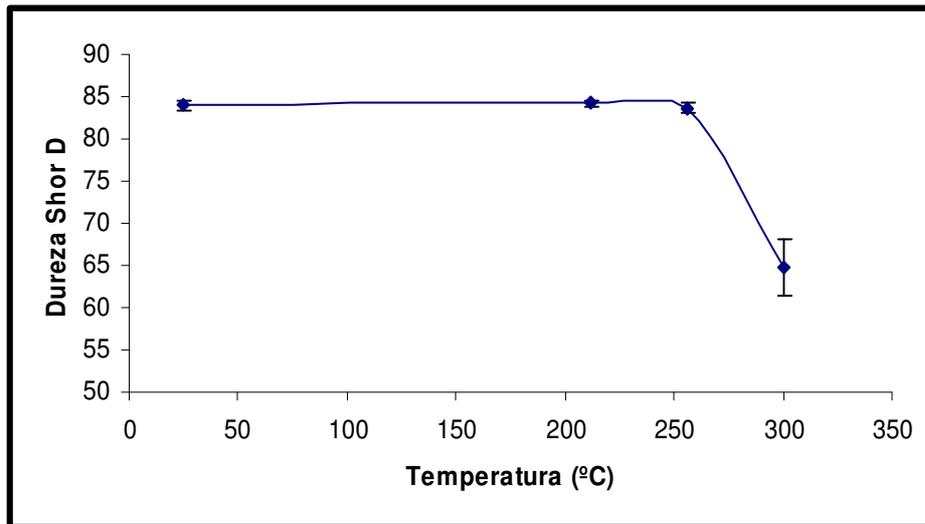


Gráfico 1 – Comparativo de Dureza Shore em diferentes temperaturas.

## 4.6 ENSAIO DE TRAÇÃO

### 4.6.1 Efeito da Temperatura

Nos Gráficos obtidos para o alongamento final, tensão máxima de escoamento, e módulo de elasticidade em função da temperatura (Gráficos 2, 3 e 4 respectivamente) ficou evidenciada que existe uma gradativa e constante queda na resistência à tração dos corpos de prova entre 25°C e 270°C. Acima de 270°C as curvas sofrem uma queda acentuada. Em ensaios complementares concluiu-se que 275°C é o limite para que o Vectra E540i não sofra alterações nas características mecânicas do material.

Com o aumento da temperatura há uma diminuição no valor da tensão máxima de escoamento e aumento na ductilidade do polímero. Esta queda é muito acentuada a 300°C quando se verifica a deterioração dos corpos de prova com formação de macro bolhas. Os valores de alongamento final (Gráfico 2) obtidos nestes ensaios são superiores ao valor fornecido pela Ticona (3,2%) (TICONA, 2008). A tensão máxima de escoamento a 25°C é tão alta quanto à da poliamida (nylon 6,6).

O uso do Vectra E540i em temperaturas ao redor de 300 °C precisa ser evitado pois existe uma clara perda das propriedades mecânicas, com o risco de quebra dos moldes e até mesmo introdução de fragmentos de polímero nos pães. Por outro lado, em temperaturas abaixo de 275°C, este material pode muito bem substituir as formas metálicas.

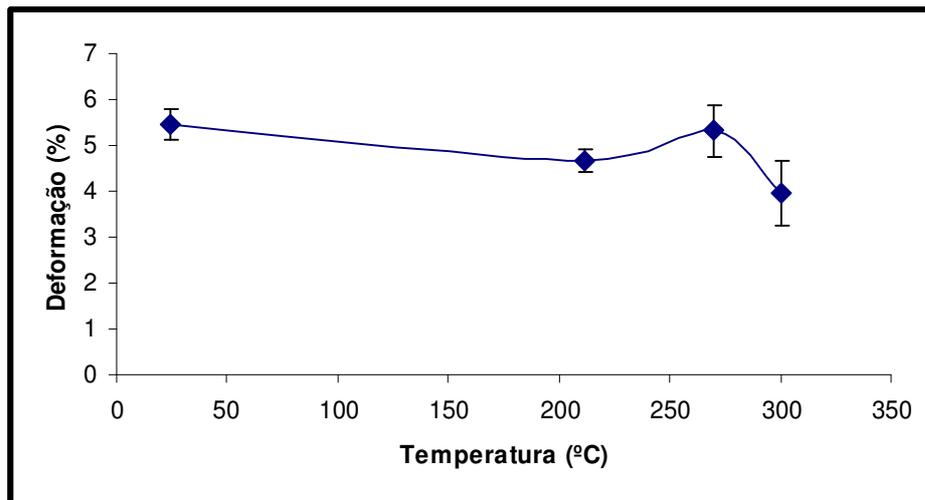


Gráfico 2 – Alongamento Final: efeito da temperatura de exposição do Vectra E540i

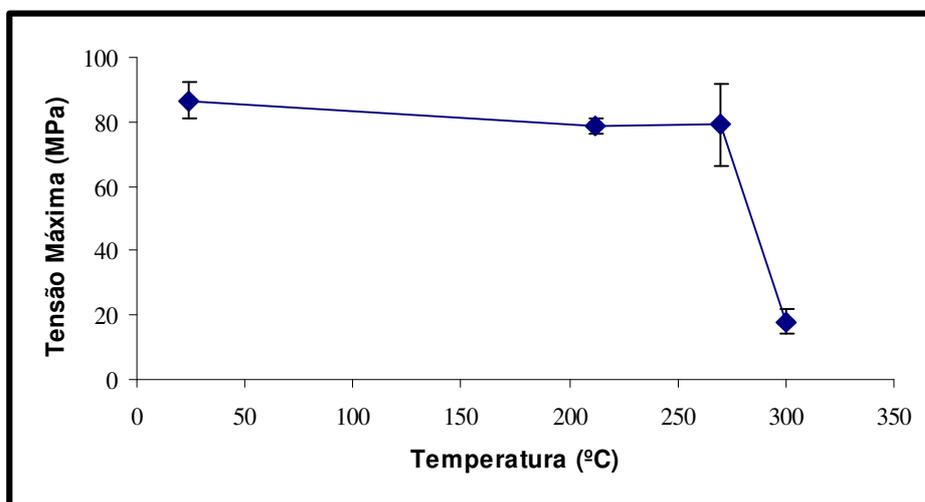


Gráfico 3 – Tensão Máxima de Escoamento: efeito da temperatura de exposição do Vectra E540i.

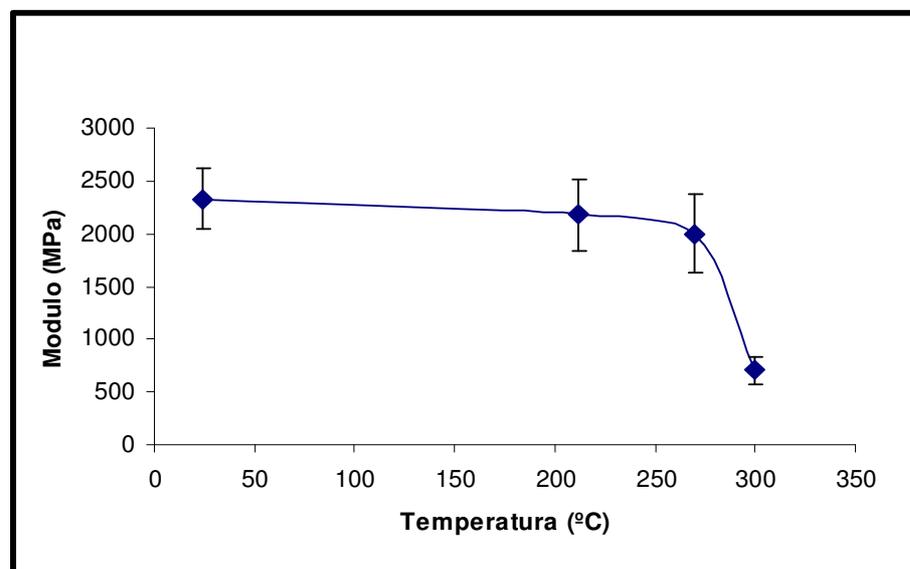


Gráfico 4 – Módulo de elasticidade: efeito da temperatura de exposição do Vectra E540i

#### 4.6.2 Efeito da Exposição ao UV

Os resultados do ensaio de tração após exposição à radiação Ultravioleta estão apresentados nos Gráficos 5 a 7.

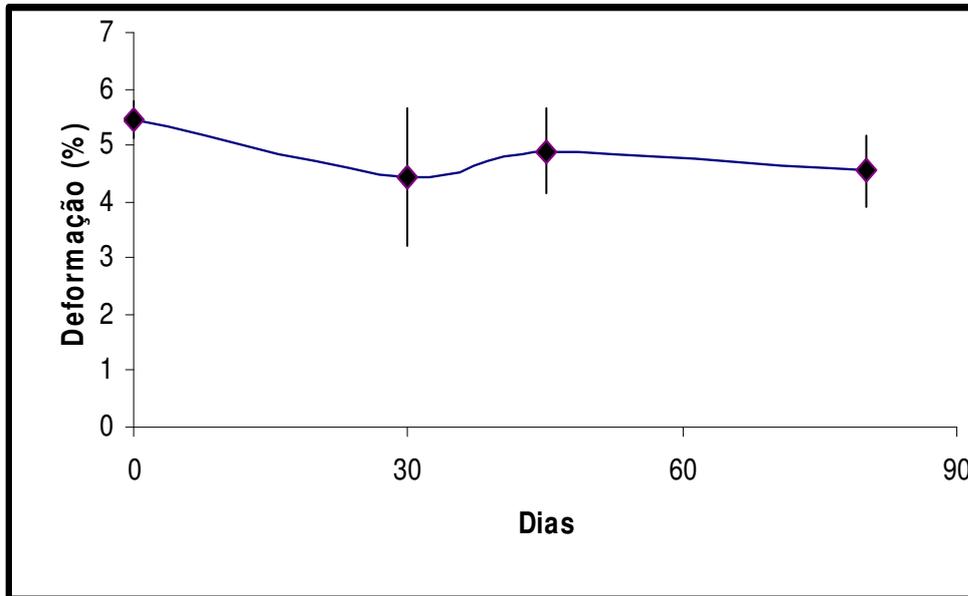


Gráfico 5 – Comparativo do alongamento final em diferentes tempos de exposição ao Ultravioleta

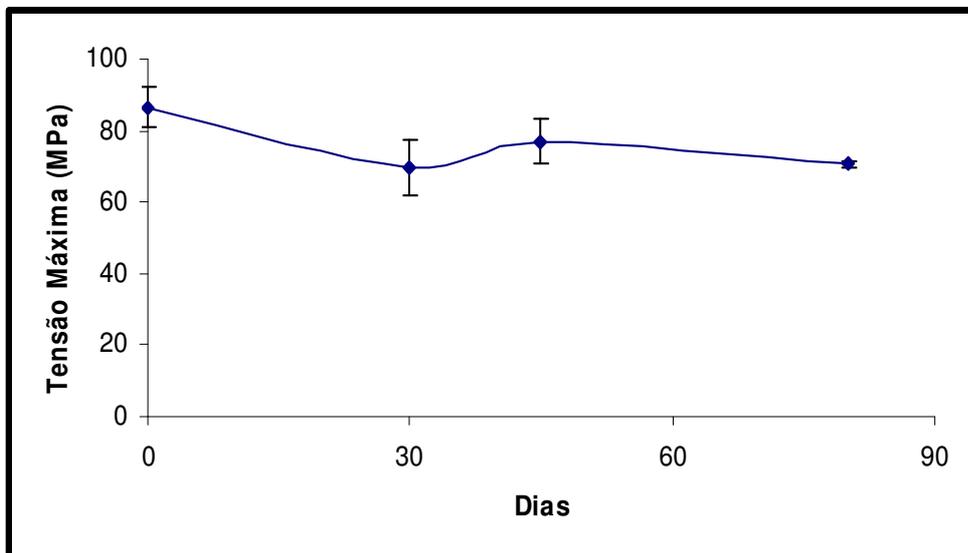


Gráfico 6 – Comparativo da Tensão Máxima em diferentes tempos de exposição ao Ultravioleta

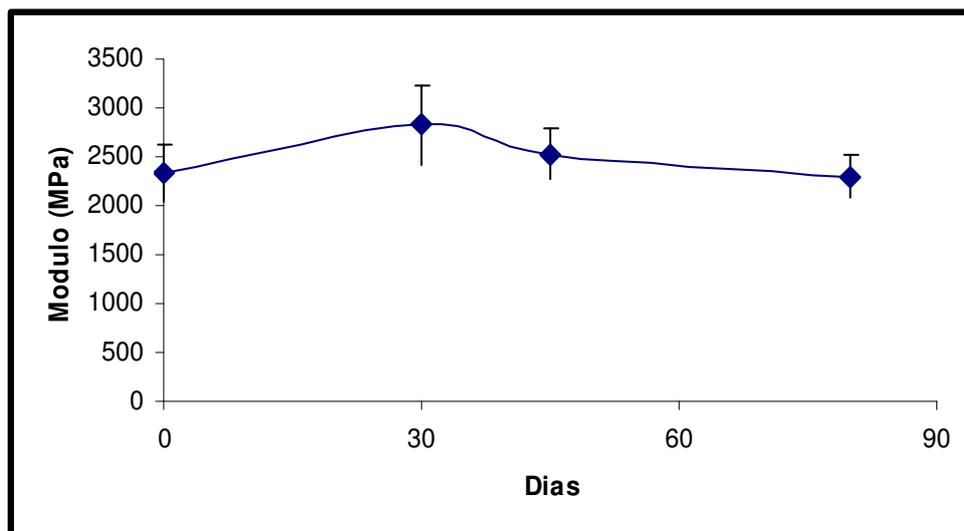


Gráfico 7 – Comparativo do Módulo de Elasticidade em diferentes tempos de exposição ao Ultravioleta

A análise dos resultados dos ensaios de tração, descritas acima, revela que não houve alterações nas características mecânicas dos corpos de prova após exposição à radiação Ultravioleta.

Os ensaios realizados em corpos de prova submetidos à radiação Ultravioleta são importantes para avaliação das condições do material após uso prolongado, principalmente quanto à capacidade de manter a superfície lisa, sem desgaste superficial o que dificulta a proliferação bacteriana, e ao acúmulo de produto em espaços abertos se houvesse desgaste das camadas externas do polímero, garantindo a segurança alimentar.

A resistência ao impacto também não teve grandes variações e a dispersão dos dados não foi muito maior em relação à verificada com as amostras sem tratamento UV.

A degradação superficial observada nas Fotografias 35 e 36, após 80 dias de exposição, têm pouca influência nas características mecânicas do Vectra E540i.

#### 4.7 ÍNDICE DE FLUIDEZ

Em geral, os materiais que são mais resistentes ao fluxo são aqueles com maior massa molecular ou aqueles que são mais fortemente reticulados. O índice de fluidez pode auxiliar na avaliação qualitativa da massa molecular de um polímero. Visto que um único tipo de VECTRA foi recebido para a realização deste trabalho experimental, e não sendo o escopo deste mestrado, o estudo do efeito da adição de diferentes porcentagens de carga mineral, a apresentação dos resultados obtidos carece de discussão.

Não há dados de MFI na literatura para o Vectra E540i e nem para o Vectra A950, matéria prima para a obtenção do primeiro. Assim sendo, não foi possível comparar os dados obtidos com dados da literatura.

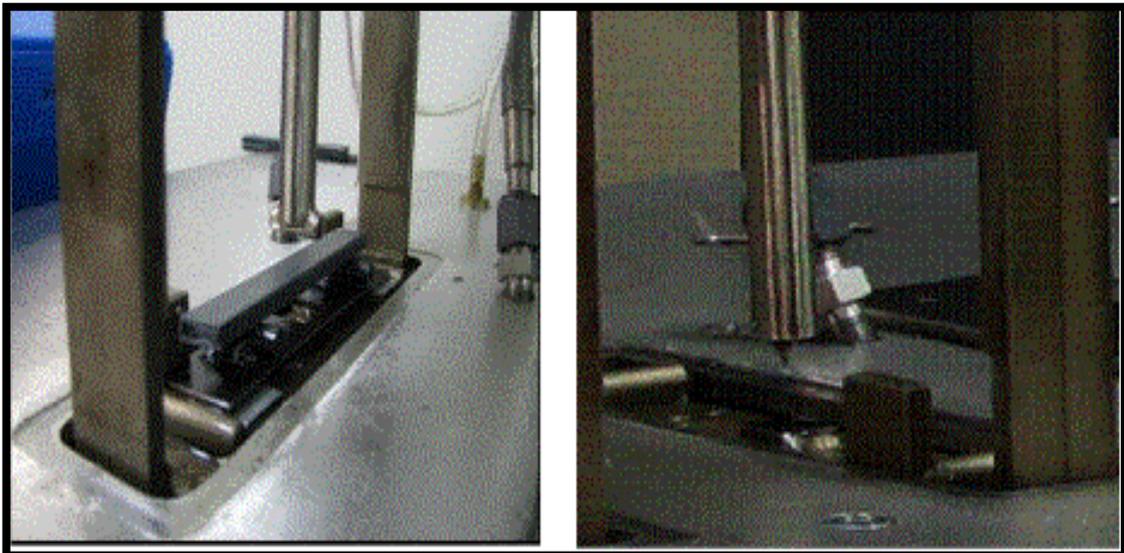
Os resultados do ensaio fornecidos em uma relação de massa por tempo de escoamento (gramas por 10 minutos) são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados do Ensaio de Índice de fluidez

AMOSTRA	MFI (g/10 min.)
1	20,68
2	19,36
3	19,40
4	20,12
5	20,48
6	20,92
7	21,68
8	22,04
9	22,92
<b>MÉDIA</b>	20,84
<b>DESVIO PADRÃO</b>	1,19

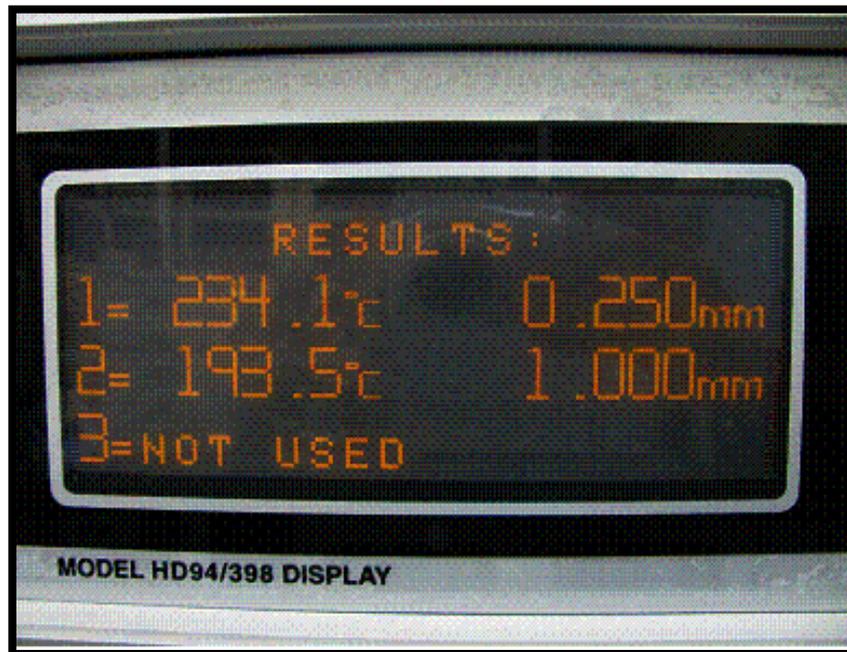
#### 4.8 TEMPERATURA DE DISTORÇÃO TÉRMICA HDT E PONTO DE AMOLECIMENTO VICAT

Na Fotografia 40 é possível observar o corpo de prova em posição para teste HDT e a agulha para penetração no corpo de prova no ensaio VICAT.



Fotografia 39 - Corpo de prova em posição para teste HDT e agulha para penetração no corpo de prova no ensaio VICAT.

Para o ensaio HDT foi necessária uma temperatura de 234,1°C para que o corpo de prova sofresse uma flexão de 0,250 mm. Já para o ensaio VICAT foi necessária uma temperatura de 193,5°C para que a agulha realizasse a penetração de 1,000 mm (Fotografia 41). Estes dados estão resumidos e comparados os dados da literatura na Tabela 10.



Fotografia 40 - Resultado dos Ensaio HDT e VICAT respectivamente.

Tabela 10 – Temperatura de Distorção Térmica HDT e Ponto de Amolecimento VICAT obtido experimentalmente e o obtido no endereço eletrônico da Empresa Ticona ([www.ticona.com](http://www.ticona.com)).

AMOSTRA	HDT (°C)		VICAT (°C)	
	Este trabalho	Ticona	Este trabalho	Ticona
Vectra A950	-	187	-	145
Vectra E540i	234,1	230	193,5	195

\*[http://www.ticona.com/index/products/liquid\\_crystal/home.htm](http://www.ticona.com/index/products/liquid_crystal/home.htm)

Comparando os valores obtidos com o Vectra A950 (sem adição de qualquer tipo de carga) e o Vectra E540i, verifica-se o efeito positivo da adição de carga mineral.

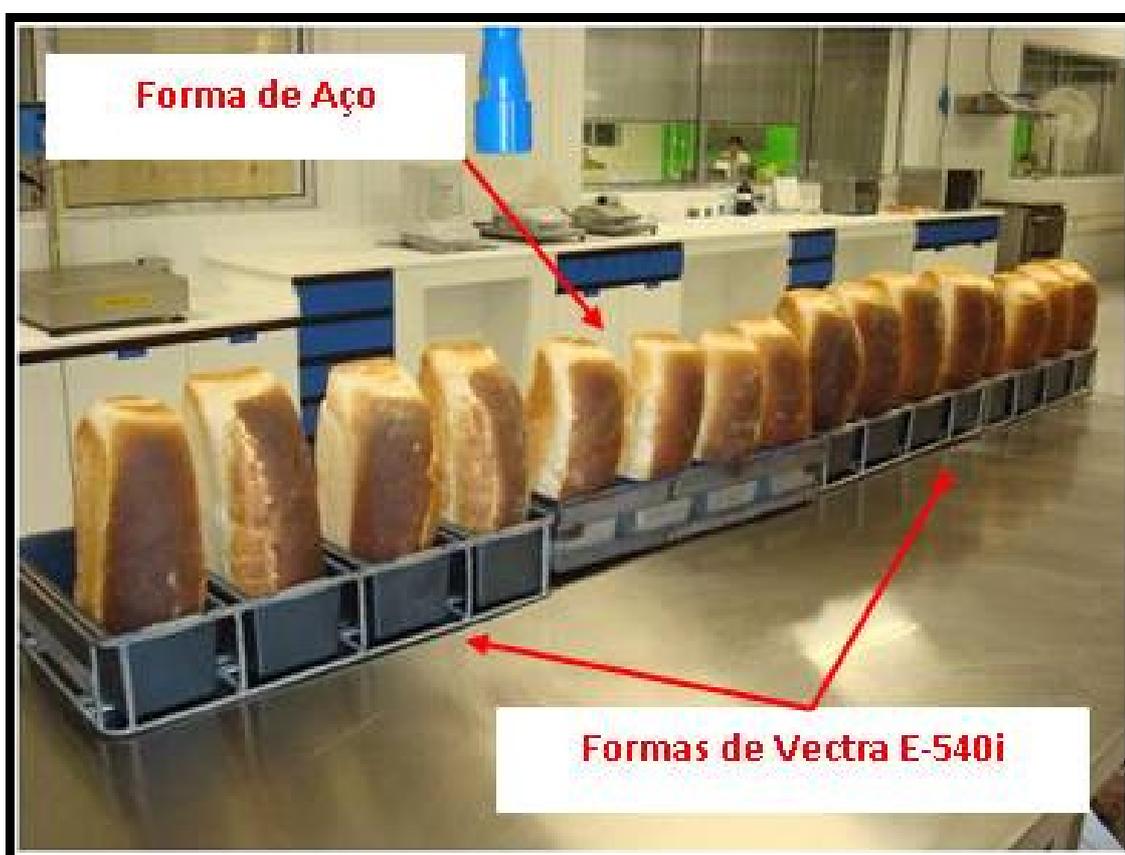
#### 4.9 TESTES PRÁTICOS

Após os ensaios práticos realizados nos fornos da Planta de São Paulo, da Planta de Mogi das Cruzes e da Planta Piloto em São Paulo, ficou evidenciado que as formas confeccionadas em polímero de cristal líquido possuem capacidade de transferência térmica, e

superfície antiaderente suficiente para uma produção em escala industrial de pães de forma em substituição as formas de aço.

Devido à maior velocidade de transferência térmica das formas de Vectra E540i em relação às formas de aço, Foi ainda necessário efetuar ajustes das curvas de assamento específicas para este material, diferentes das curvas de assamento utilizado para as formas de aço. A curva de assamento se faz com ajustes individuais de fluxo de ar quente que circula nas diversas câmaras de aquecimento existentes em um forno industrial. Estes ajustes não significam necessariamente que o forno irá trabalhar com uma temperatura mais elevada ou menos elevada na fonte primária de calor, que é o queimador a gás, mas que o calor será distribuído de forma diferente nas etapas de assamento do pão. Podendo por exemplo, ter uma temperatura maior no início do processo de assamento que no final do processo de assamento.

Após os ajustes da curva de assamento verificou-se ser possível a produção de pão em escala industrial utilizando formas de polímero de cristal líquido em substituição às formas metálicas usadas até o momento. Nas Fotografias 42 e 43 é possível observar uma produção de pães que foram assados em formas de Vectra E540i.



Fotografia 41 - Análise visual de parte superior de pães após assamento em formas de Vectra e em formas de aço.



Fotografia 42 - Análise visual de parte inferior de pães após assamento em formas de Vectra e em formas de aço.

#### 4.10 DISCUSSÃO FINAL

Embora seja difícil calcular os esforços mecânicos a que as formas de polímero de cristal líquido são submetidas durante uma produção em escala industrial, realizada de forma contínua dia após dia, durante meses ou anos, os resultados dos ensaios mecânicos obtidos a nível laboratorial e apresentados nos subitens anteriores, são importantes para conhecer os limites e as características do Vectra E540i. Por outro lado, os resultados dos ensaios físico-químicos permitem confirmar a inércia do material e justificar seu uso na indústria de panificação.

Os ensaios de dureza Shore D e tração, realizados em corpos de prova submetidos a tratamentos térmicos abaixo da temperatura de trabalho do forno (212 °C), na temperatura de trabalho do forno (256°C) e acima da temperatura de trabalho (300 °C), são importantes para se conhecer o limite de resistência térmica do Vectra E540i e saber se este material suportará as temperaturas normais ao processo industrial de panificação.

A exposição à radiação UV, não danifica as formas de Vectra E540i.

Problemas surgidos durante o assamento em consequência da adesão dos pães na forma e aumento de descartes, podem ser facilmente resolvidos ajustando-se a curva de assamento.

Do ponto de vista de resistência mecânica, física e química não há impedimento do uso de forma de Vectra E540i em substituição às formas de aço carbono revestidas.

## 5 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos a nível laboratorial e os ensaios realizados na Indústria de Panificação, é possível concluir que:

- a) Vectra E540i é um polímero de cristal líquido que contém 39% de carga mineral e 61% de voláteis, conforme foi verificado por calcinação a 800°C.
- b) Não foram observadas mudanças na dureza do Vectra E540i com o tratamento térmico em temperaturas inferiores a 300°C.
- c) Até temperaturas iguais a 275 °C, o tratamento térmico afeta pouco as propriedades mecânicas do Vectra E540i. Para temperaturas acima deste valor, há degradação do material com formação de bolhas que afetam tanto a resistência à tração como a dureza do material.
- d) Vectra E540i não é sensível à degradação em ambiente com radiação ultravioleta. Ocorre apenas uma degradação superficial com escurecimento do material. Esta degradação não afeta as propriedades mecânicas como resistência à tração, dureza e resistência ao impacto.
- e) Apesar dos fornos para produção de pães de forma ter uma temperatura de trabalho inferior a 300°C, há formação de bolhas, caso esta temperatura seja atingida, pode afetar o cozimento do pão e suas características devido a ruptura destas bolhas e sedimentação de fragmentos.
- f) Após ataque com ácido sulfúrico nas concentrações de 20%, 40%, 60%, 80%, não foram observadas alterações do material. A 98% de concentração a amostra foi totalmente degradada.
- g) Formas de Vectra E540i têm superfície antiaderente e lisa e podem ser usadas em substituição a formas de aço carbono, em indústrias de panificação.
- h) A substituição das formas de aço carbono por forma de Vectra E540i gera uma economia de cerca 12% no custo das formas para 10.000 ciclos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards**. West Conshohocken: ASTM, 1997. v. 08.01 Plastics.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards**. West Conshohocken: ASTM, 1997. v. 08.02 Plastics.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards**. West Conshohocken: ASTM, 1997. v. 09.01 Rubber, natural and synthetic – General tests methods; carbon black.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards**. West Conshohocken: ASTM, 1997. v. 10.03 Electrical insulating liquids and gases; electrical protective equipment.

ATKINS, P. W.; JONES, L. **Princípios de química**: questionando a vida moderna e o meio ambiente. 3.ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2006. 965 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA PANIFICAÇÃO (ABIP). **História do pão**. São Paulo: ABIP, ano. Disponível em: [www.abip.org.br/historiadopao.asp](http://www.abip.org.br/historiadopao.asp). Acesso em: 18 jun. 2008.

BENICEWICZ, B.; Shao, J. US Patent 7317066 - Liquid crystal polymers. January 8, 2008.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CANAVEROLO Jr., S. V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2004.

Cholesteric Liquid Crystal Polymer Pigments Overview - High Performance Pigment Conference, January 23, 2002. Disponível em: [www.chelix.com/pdfs/hpp\\_pigment\\_overview.pdf](http://www.chelix.com/pdfs/hpp_pigment_overview.pdf). Acesso em: 12 jul. 2007.

COLLINGS P. J., and HIRD M., Introduction to Liquid Crystals Chemistry and Physics – Taylor e Francis Ltd, 1997.

COWIE, J.M.G. **Polymers: Chemistry and Physics of Modern Material**. Cheltenham U.K.: Stanley Thornes (Publishers) Ltd., 1991.

ELAMIN, A. Ticona claims new coating for cooking increases productivity. Breaking News on Food Processing & Packaging. Disponível em: <http://www.foodproductiondaily.com/FOOD>. Acesso em: 5 ago. 2008.

FLODBERG, G.; AXELSON-LARSSON, L.; HEDENQVIST; GEDDE, M. S. U. W. Liquid crystalline polymer pouches for local anaesthetic emulsion. Received: 24 April 2001; Accepted: 25 July 2001. Disponível em: <http://www.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 4 ago. 2008.

GAIA CAMPOS, L. E. de. Talco e Pirofilita. *Balanço Mineral*, 2001. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral2001/talco.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2010.

GREENWOOD, N. N.; EARNSHAW, A. Chemistry of the Elements. Cambridge: Pergamon Press, 1994.

MANO, E. B.; MENDES, L. C.. **Introdução a polímeros**. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Edgard Blücher, 2001. 191 p.

TICONA Vectra® liquid crystal polymers (LCP), Vectra Brochure English 72-dpi part 1. September 2001b. Disponível em: [www.ticona.com/](http://www.ticona.com/). Acesso em: 5 ago. 2008.

TICONA Vectra® liquid crystal polymers (LCP), Vc7. September 2001b1. Disponível em: [www.ticona.com/](http://www.ticona.com/). Acesso em: 5 ago. 2008.

TICONA Engineering polymer. Disponível em: [www.ticona.com/](http://www.ticona.com/) Acesso em: 11 ago. 2008b.

TICONA Engineering polymer. Polímeros de alto desempenho para panificação e residências. Disponível em: [www.ticona.com/](http://www.ticona.com/) Acesso em: 13 ago. 2008b1.

TICONA Vectra® liquid crystal polymers (LCP), Product Information Sheet. Drying Vectra LCP Resins. Ticona TDS97-01vc (ver. 3). November 2000. Disponível em: [www.ticona.com/](http://www.ticona.com/). Acesso em: 5 ago. 2008.

TICONA Vectra® liquid crystal polymers (LCP). Product information sheet. regrinding techniques. Ticona 02-313/0102 2002. Disponível em: [www.ticona.com/](http://www.ticona.com/). Acesso em: 5 ago. 2008.

TOQUER, G.; PHOU, T.; MONGE, S.; GRIMALDI, A., ; NOBILI, M.; BLANC, C. Colloidal shape controlled by molecular adsorption at liquid crystal interfaces. J. Phys. Chem. B Letters. Published on Web 03/15/2008. Disponível em: <http://www.periodicos.capes.gov.br/> Acesso em: 28 jul. 2008.

WANG, Y. L.; YUE C. Y.; TAM, K. C.; HU X. Relationship between processing, microstructure, and mechanical properties of injection molded thermotropic LCP. J Appl Polym Sci 88: 1713-1718, 2003. Received: 10 May 2002; Accepted: 1 August 2002. Disponível em: <http://www.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 4 ago. 2008.

# Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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