

8

Referências bibliográficas

- 1 ISO/TS 24817:2006 - **Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Composite repairs for pipework - Qualification and design, installation, testing and inspection.**
- 2 AEA Technology Consulting for the Health and Safety Executive - Temporary/permanent pipe repair – Guidelines, United Kingdom, 2001 / 038.
- 3 KIEFNER, J. F.; BRUCE, W. A.; STEPHES, D. R., **PRCI PR-218-9307 - Pipeline Repair Manual**, rev . Dez/1994.
- 4 ROSAS, M. A. - **Análise de Dutos com Perda de Espessura Reparados com Multicamadas Metálicas Coladas** – Dissertação de Mestrado – PUC - Rio, 2006.
- 5 FREIRE, J. L. - **Análise da Integridade de Dutos. Noções Básicas.** Engenharia de Dutos – PUC – Rio, 2004.
- 6 GOMES, L. F. M.– **O Mercado Potencial para o Transporte por Dutos no Brasil**, PUC-Rio, 1984.
- 7 StrongBack Book – **Technical Information – The Easily Installed Cost Effective Solution for external pipeline remediation**, Texas.
- 8 Site: www.clockspring.com.
- 9 Site: www.integpipelineservices.com.
- 10 Site: www.neptuneresearch.com.
- 11 Site: www.rust.com.br.
- 12 CUNHA, J. A. P.; COSTA, M. L.; REZENDE, M. C.– **Influência de diferentes condições higrotérmicas na resistência a tração de compósitos de fibra de carbono/epóxi modificada**, Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 16, n° 3, p. 193-201, 2006, São José dos Campos, SP., 2006.
- 13 MOROPOULOU, A. - **Drying kinetics of some building materials**, v. 22, São Paulo, Jun/2005.
- 14 McMULLEN, P. - **Fiber Resin Composites for aircraft primary structures: a short history**, 1936-1984. Composites, v. 15, n. 3, Jul/1984.
- 15 MOSLEMI, A. A. - **Emerging technologies in mineral-bonded wood and fiber composites. Advanced Performance Materials**, v. 6, October/1999.
- 16 SHELDON, R.P. **Composite Polymeric Materials**. England: ed.1, Applied Sci. Pub.,1982.
- 17 REZENDE, Mirabel C. e BOTELHO, Edson C. - **O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial**, São Carlos - SP, v. X, n. 2, p. E4-E10, 2000.
- 18 GIBSON, I. M., ISHAI, O. - **Engineering Mechanics of Composite Materials**, Oxford, UK, 1994.
- 19 HULL, D. - **An Introduction to Composite Materials**. UK: Cambridge Univ. Press. Cambridge, ed.1, 1981.

- 20 AGARWAL, B. D.; BROUTMAN, L. J. - **Analysis and Performance of Fiber Composites**. John Wiley & Sons, ed. 1, New York, USA, 1980.
- 21 MANO, E.B. - **Polímeros como materiais de engenharia**, Editora Edgar Blucher Ltda, São Paulo, 1991.
- 22 FOLKES, M. J. - **Short Fiber Reinforced Thermoplastics**. Research Studies Press, ed. 1, England, 1985.
- 23 SHELDON, R.P. - **Composite Polymeric Materials**. England: ed.1, Applied Sci. Pub.,1982.
- 24 ASHBY, M. - **Materials selection in mechanical design**, Pergamon Press,Tarrytown, NY, ed. 3, 1992.
- 25 MARCZAK, R. J. - **Polímeros como materiais de engenharia**. UFSCar, São Carlos - SP, 2004.
- 26 AGNELLI, J. A. M. - **Verbetes em polímeros. Departamento de Engenharia de Materiais – UFSCar**, São Carlos - SP, 2000.
- 27 Site: www.azom.com.
- 28 LIMA S. L. - **Desenvolvimento de Matriz Polimérica para Material Compósito visando o Reforço de Dutos de Aço**, Tese de M.Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- 29 ROYLANCE, D. - **Pressure Vessels**, Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2001.
- 30 MISHRA, S.; MOHANTY, A. K.; DRZAL, L. T.; MISRA, M., PARIJA, S.; NAYAK, S. K.; TRIPATHY, S. S. - **Studies on mechanical performance of bio fiberglass reinforced polyester hybrid composites**, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 26, University Anantapur – India, 2007.
- 31 CURTY, L. A — **Reforço Estrutural com Compósitos de Fibra de Carbono**, Tese de M.Sc, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
- 32 FUJIYAMA, R. T - **Materiais Compósitos para Reparo de Dutos em Ambiente Terrestre com Defeitos Internos**, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
- 33 BENTUR, A.; MINDESS, S. - **Fiber Reinforced cementitious composites**. *Londres: Elsevier applied science*, Elsevier Applied Science, London, 1990.
- 34 MANTILLA CARRASCO, E. V. - **Ligações estruturais de Madeira por adesivos**, Tese de M.Sc , UFSCar, São Carlos - SP, 1984.
- 35 TSAI, S. W. **Composite Desing**. USA: 4ed, 1988.
- 36 Autor Desconhecido – **Deterioração de matérias por exposição à radiação solar ultravioleta (R-UV)**, 2004.
- 37 SANTOS, K. A. M. – **Estudo da fotodegradação de poliisoprenos naturais (borrachas naturais) em radiações específica ultravioleta (UV)**, Univ. Ci. Saúde, Brasília, v. 3, n. 2, 2005.
- 38 WIEBECK, H. e RODRIGUES, A. A. - **Utilização do pó de pneu como agente modificador de propriedades das pastas vinílicas**, Tese de M.Sc, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2002.
- 39 SANTOS, A. M.; AMICO, T. H. D; CAMPOS, S. – **Estudo de compositos hibridos polipropileno/fibras de vidro e coco para aplicacoes em engenharia**, 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, Novembro/2006.
- 40 CASTELLARES, L. G - **Reparo de dutos danificados utilizando materiais compósitos**, 6ª COTEQ , Salvador, Agosto/2002.
- 41 ROSS, G.; BIRLEY, A. W. – **Thermoplastics: Properties and design**, produced

- by Imperial Chemical Industries Limited, Plastics Division, London, 1974.
- 42 FROHNSDORFF, G.; MASTERS, L. W. - **The meaning of durability and durability prediction**, ASTM special technical publication ISSN 0066-0558 CODEN ASTTA8, Philadelphia, PA, 1980.
 - 43 PIHLAJAVAARA, S. E. - **Background and principles of long-term performance of building materials**, ASTM special technical publication ISSN 0066-0558 CODEN ASTTA8, Philadelphia, PA, 1980.
 - 44 DECKER, C. - **Degradation and Stabilization of PVC**, E. Owens, Ed., Elsevier Appl. Sci. Publ., London, 1984.
 - 45 Site: <http://satelite.cptec.inpe.br/uv/>.
 - 46 Site: <http://kajkrause.blogspot.com/2009/06/o-espectro-eletromagnetico.html>.
 - 47 GUGUMUS, F. - **Antioxidants** - Plastics additives handbook, 6º ed., Alemanha, 1990.
 - 48 Site: <http://goldbook.iupac.org/P04595.html>.
 - 49 BLAGA - **Procedimentos para Avaliação da Graduação de Reservatórios de Polietileno para água Potável expostos as Intempéries** – Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP – Dep. de Engenharia Civil, 2005.
 - 50 BS 2782 - **Methods of testing plastics. Glass reinforced plastics. Measurement of hardness by means of a Barcol impressor**, 1977.
 - 51 ISO 4607 - **Plastics - Methods of exposure to natural weathering**, Vo. 12, 1993.
 - 52 ASTM D1435 - 05 - **Standard Practices for Outdoor Weathering of Plastics**, 2005.
 - 53 GRI-98/0032 - **Field Validation of Composite Repair of Gas Transmission Pipelines**, Chicago, Abril/1998.
 - 54 TELLES, P. C. S. - **Tubulações Industriais**, 7 ed., Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora LTDA, 1987.
 - 55 LIMA S. L. - **Desenvolvimento de Matriz Polimérica para Material Compósito visando o Reforço de Dutos de Aço**, Tese de M.Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
 - 56 JUVINALL, R. C.- **Engineering Considerations of Stress, Strain and Strength**, McGraw-Hill - Nova York, 1967.
 - 57 SAOUMA, V. E - **Fracture Mechanics**, Journal of Structural Engineering, Vol. 110, No. 4, April/1984.
 - 58 COSHAM, A.; HOPIKNS, P.; MACDONALD, K. A. – **Best Practice for the assessment of defects in pipelines – Corrosion**, University of Stavanger, UK, February, 2007.
 - 60 **API Recommended Practice 579, Fitness for Service**, American Petroleum Institute, First Edition, jan.2000.
 - 61 Site: <http://www.owenscorning.com.br/nivel.asp>.
 - 62 MENINCONI, L. C.M.;VIEIRA, R. D.; FREIRE, J. L.F; DINIZ, J. L.C; CASTRO, J. T. P. – **Análise do desempenho de sistemas de reparo de dutos por materiais compostos** - 5ª COTEQ, Petrobras/Cenpes, São Paulo, Brasil, 2001.
 - 63 MENINCONI, L. C.M; VIEIRA, R. D.; FREIRE, J. L.F; DINIZ, J. L.C – **Reparação de defeitos internos e externos em dutos através de mangas externas de materiais compostos fornecidas pela Strongback**, Junho/2002.
 - 64 **ASME B31.4, Pipeline Transportation System for Liquids Hydrocarbons and**

- Other Liquids**, ASME Code for Pressure Piping, B31, An American National Standard, 1998.
- 65 **DNV-RP-F101 – Corroded Pipelines**, October/2004.
- 66 **NACE SSPC SP3 - Power Tool Cleaning** - Society for Protective Coatings, 1982.
- 67 Site: www.emite.com.br.
- 68 **ASTM D 570 - Standard Test Method for Water Absorption of Plastic**, 1995.
- 69 **ISO 1172 - Textile Glass Reinforced Plastics - Determination of Loss on Ignition**, 2002.
- 70 **ASTM D3039M - Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**, 2008.
- 71 **ASTM D790 - Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulation Materials**, 2003.
- 72 **CORTÊS, R. M. A. – Dimensionamento de reforços em dutos metálicos com compósitos de matriz polimérica**. Tese de M.Sc, Universidade Federal Fluminense (UFF), 2001.
- 73 Site: www.integpipelineservices.com.
- 74 Site: www.wikipedia.com.
- 75 **HOUWINK, R.; SALOMON, G. - Adhesion and adhesives**. New York: ed.2, Elsevier Publishing Company, 1965.
- 76 **CARVALHO, A. – Fibras de vidro**. São Paulo: EPUSP Simpósio Internacional sobre materiais reforçados com fibras para construção civil, anais, 1993.
- 77 **MOTTA, L. A. C.; SILKUNAS, N.; JUNIOR, A. R. – Durabilidade dos Polímeros**, Universidade de São Paulo – Escola Politécnica, 2002.
- 78 **THOMAZI, C. T. – Comportamento mecânico de dutos metálicos reparados com materiais compósitos**, Tese de M.Sc, Brasília, Março/2006.
- 79 Site: www.sylvania.com.br.

9

Glossário

Segue, através de um glossário, o significado de algumas palavras-chaves mencionadas durante a tese.

1 – StrongBack: Empresa que trabalha com reforços/reparos de materiais compostos. Um dos materiais fabricados por ela foi o utilizado no desenvolvimento/estudo desta tese [73];

2 – Monômeros: (do latim "mono", "um" e "meros", "parte") é uma pequena molécula que pode ligar-se a outros monômeros formando moléculas maiores denominadas polímeros [74];

3 – Polímeros: (do latim, “mero” significa parte; e “poli” significa muitos, vários) são macromoléculas formadas a partir de unidades estruturais menores (os monômeros). São compostos químicos de elevada massa molecular, resultantes de reações químicas de polimerização [74];

4 – Polimerização: é uma reação em que as moléculas menores (monômeros) se combinam quimicamente (por valências principais) para formar moléculas longas, mais ou menos ramificadas com a mesma composição centesimal. Estes podem formar-se por reação em cadeia ou por meio de reações de poliadição ou policondensação. A polimerização pode ser reversível ou não e pode ser espontânea ou provocada (por calor ou reagentes) [74];

5 – Polímeros Termoplásticos:

De acordo com o comportamento térmico durante o processamento, as resinas podem ser classificadas em termoplásticas ou termorrígidas. A principal diferença entre elas está no comportamento característico quando aquecidos.

Os polímeros termoplásticos podem ser amolecidos ou liquefeitos por aquecimento e endurecidos por resfriamento, repetidas vezes, sem perder as suas propriedades. As ligações entre as cadeias dos termoplásticos são predominantemente secundárias por isso, quando aquecidos tais ligações são enfraquecidas pela vibração das moléculas, tornando-os materiais plásticos, podendo ser remodelados. Alguns exemplos de termoplásticos são: polietileno, poliestireno, PVC, nylon, etc. A estrutura molecular pode ser linear ou ramificada. Segue abaixo tabela apresentando as principais características de polímeros termoplásticos e termorrígidos:

TERMOPLÁSTICOS	TERMORRÍGIDOS
Reciclável mecanicamente	Não reciclável mecanicamente
Tempo ilimitado de armazenamento	Tempo limitado de armazenamento
Alta viscosidade quando fundido	Baixa viscosidade quando fundido
Baixa resistência à fluência	Alta resistência à fluência
Baixa estabilidade térmica e dimensional	Alta estabilidade térmica e dimensional
Baixa rigidez	Elevada rigidez
Baixo isolamento térmico e elétrico	Bom isolamento térmico e elétrico
Baixa resistência a deformação	Boa resistência a deformação (comportamento frágil)

Tabela – Comparação entre as propriedades dos termoplásticos e termorrígidos

Com base nas características acima, tem-se que os polímeros termorrígidos mais utilizados apresentam boas propriedades estruturais, entretanto, apresentam maior fragilidade, podendo vir a colapsar sem aviso prévio, visto que sua estrutura estável não permite o mecanismo de escorregamento das cadeias umas sobre as outras, antes da fratura [21,75];

6 – Ligações covalentes: é caracterizada pelo compartilhamento de um ou mais pares de elétrons entre átomos, causando uma atração mútua entre eles, que mantêm a molécula resultante unida. Átomos tendem a compartilhar elétrons de modo que suas camadas eletrônicas externas sejam preenchidas e eles adquiram uma distribuição eletrônica mais estável. A força dessas ligações é maior que a

das interações intermoleculares e comparável à da ligação iônica. Ligações covalentes normalmente ocorrem entre átomos com eletronegatividades similares (geralmente entre dois não-metais), dos quais remover completamente um elétron requer muita energia. Um tipo especial de ligação covalente é a ligação covalente dativa, também conhecida como ligação covalente coordenada, que ocorre quando um único átomo fornece ambos os elétrons da ligação. Esse tipo de ligação tende a ser mais forte que outros tipos de ligações, como a iônica. Como resultado, moléculas covalentemente ligadas tendem a formar-se em um número relativamente pequeno de formas características, exibindo ângulos de ligação específicos [34,74];

7 – Ligação cruzada: Ligação envolvendo pares de cadeias de polímeros, que resulta na formação de rede tridimensional, responsável pela insolubilidade e infusibilidade do polímero. Este tipo de ligação é também denominada reticulação [74];

8 – Peso Molecular (massa molecular): é a massa de uma molécula de determinada substância relativa à unidade de massa atômica u (igual a $1/12$ da massa do isótopo carbono-12, ^{12}C) [74];

9 – Polímeros Cristalinos:

Os polímeros podem ser classificados em cristalinos ou amorfos, embora não possam ser 100% cristalinos, haja vista a sua estrutura altamente organizada. Dessa maneira, a maioria dos polímeros são considerados semicristalino.

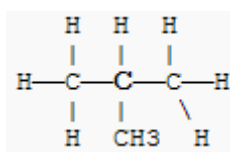
Os polímeros que possuem arranjos cristalinos regulares e um padrão de repetição são caracterizados como materiais cristalinos. Uma característica distinta é que esses polímeros possuem um ponto de fusão bem definido, o que permite um controle preciso da matéria prima, durante o processo de fabricação, fator preponderante para a indústria. Uma desvantagem é que se contraem significativamente durante o resfriamento. Quanto maior a cristalinidade dos polímeros, maior a densidade, a rigidez e a resistência mecânica, térmica e a solventes.

Dependendo da temperatura, o comportamento frágil ou dútil não é bem definido para polímeros amorfos, enquanto que para os cristalinos, há uma transição clara, e a temperatura de fusão é utilizada como parâmetro [21,74,75];

10 – Ligações de Van der Waals: também conhecida por forças de London, dipolo instantâneo e dipolo induzido refere-se às forças intermoleculares formadas devido ao movimento da nuvem eletrônica e consequente polarização das moléculas.

O termo forças de Van der Waals, atualmente, refere-se a forças intermoleculares resultantes da polarização das moléculas, em homenagem ao físico holandês Johannes Diderik van der Waals, o primeiro a documentar essas interações. Estas interações são muito fracas e atuam apenas quando as moléculas estão bem próximas umas das outras [74];

11 – Carbonos terciários: é um átomo de carbono que se encontra unido a outros três átomos de carbono [74]. Por exemplo:



12 – Plastificantes: Substância adicionada à composição polimérica para reduzir as forças intermoleculares, facilitando o processamento e modificando as propriedades do material. Essa substância pode ser de baixo peso molecular, oligomérica ou polimérica, sendo também chamada de plastificante externo [74];

13 – Cisão enzimática: são reações que provocam a quebra de uma cadeia polimérica [74];

14 – Lixiviação: é o processo de extração de uma substância sólida através da sua dissolução num líquido [74];

15 – Anisotropia: (ani: não, iso: igual, tropia: volta) é a característica que uma substância possui em que uma certa propriedade física varia com a direção [74];

16 – Hidroxila: é um grupo funcional presente nas bases dos hidróxidos, representado pelo radical OH^- e formado por um átomo de hidrogênio e um de oxigênio. Obtidas geralmente através da dissociação de uma base, as hidroxilas também determinam o caráter ácido-básico (pH) de uma solução, sendo que quanto maior sua concentração, maior é o caráter básico e menor o ácido [74];

18 – CTDUT (Centro de Tecnologia em Dutos): centro tecnológico destinado ao desenvolvimento na área de dutos. Possui instalações em escala real e laboratórios de pesquisa destinados a testes de produtos, equipamentos e sistemas, utilizados na malha duto viária. Todos os ensaios de ruptura foram realizados no CTDUT (Site: www.ctdut.org.br; Endereço: Rua Ingá, 997 - Campos Eliseos Duque de Caxias – RJ);

19 – OPETC: Empresa que representa a Strongback no Brasil. A mesma forneceu gratuitamente todo material utilizado no reparo dos dutos e as placas de compósito para confecção dos corpos de prova. Ela também realizou todo processo de aplicação sem nenhum custo. (Site: www.optec.com.br; Endereço: Rua: Adilson Seroa da Mota- nº 270 Sala 301 - Barra da Tijuca - Rio de Janeiro);

20 – Hidrólise: é uma reação química de quebra de uma molécula por água. Reação de alteração envolvendo fluido aquoso com íons de hidrogênio (H^+) ou de hidroxila (OH^-) substituindo íons que são liberados para a solução [74];

21 - ITUC – PUC (Instituto Tecnológico da PUC – Rio): consta de atividades dedicadas à prestação de serviços tecnológicos, tanto em apoio às atividades acadêmicas do CTC (Centro Técnico Científico) e de outros centros da PUC - Rio, como em atendimento à indústria e a outros setores da economia. Todos os ensaios de tração, flexão e análise do material compostos foram realizados pelo ITUC. O mesmo está localizado na PUC, endereço (Site: www.ituc.puc-rio.br; Endereço: Rua Marques de São Vicente, 225 Gávea Rio de Janeiro RJ);

10

Apêndice

A

Processos de fabricação de material composto (fibra de vidro-resina) [72]

Diversos são os métodos/tecnologia aplicada no desenvolvimento de materiais compostos. Sendo a matriz o componente determinante na escolha do processo de fabricação, uma vez que os compostos com matriz polimérica são fabricados de maneira distinta dos compostos com matriz cerâmica ou metal, segue abaixo alguns dos métodos utilizados.

- **Processo de decomposição manual – *Hand lay-up***

Trata-se do processo mais simples e mais barato, adequado para peças grandes e em pequenas quantidades. Primeiramente é aplicado um revestimento de gel no molde aberto. Em seguida, a manta é posicionada manualmente, e então, com auxílio de um rolo de espuma, aplica-se a resina.. A função do rolo ou pincel é fazer com que a resina molhe completamente o tecido ou manta, para a remoção de vazios ou ar que possam estar aprisionados.

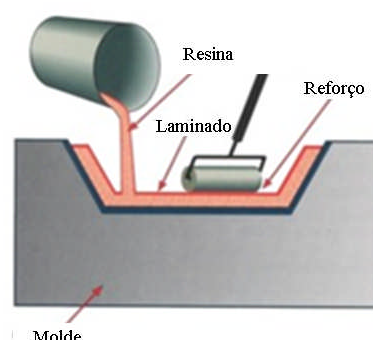


Figura A.1 - Processo de deposição manual (Fonte: www.flexidynamic.com).

- **Processo de Spray**

Bastante semelhante ao processo anterior, podendo ser utilizado para cascos de barcos, partes externas de aeronaves, banheiras e bases de chuveiro. Consiste na deposição simultânea, sobre um molde, de resina e de pedaços de feixes de fibras, através de uma pistola de corte e projeção, sendo esta alimentada por um feixe contínuo de multi-fios.

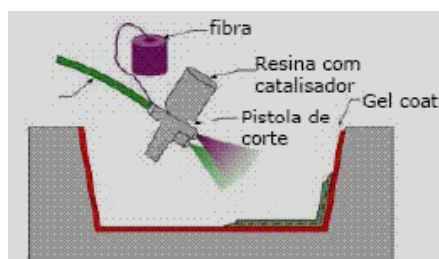


Figura A.2 - Processo de spray (Fonte: www.netcomposites.com).

- **Processo de autoclave em embalagem de vácuo**

É o processo padrão usado na indústria aeronáutica, com tecidos do tipo prepreg, constituídos de fibras, tecidos ou mantas que são pré-impregnados com resina, antes de serem armazenados para uso posterior em moldes, e em formação de camadas. Trata-se do processo de fabricação utilizado na confecção do material deste trabalho.

Primeiramente, o tecido pré-impregnado é cortado no tamanho desejado, colocado uns sobre os outros em camadas e com as fibras dispostas na direção desejada. Em seguida, o conjunto é fechado conjuntamente com o molde numa embalagem, onde é feito o vácuo, com a finalidade de remoção de ar aprisionados e vazios. Posteriormente, o sistema é colocado numa autoclave para a cura da resina.

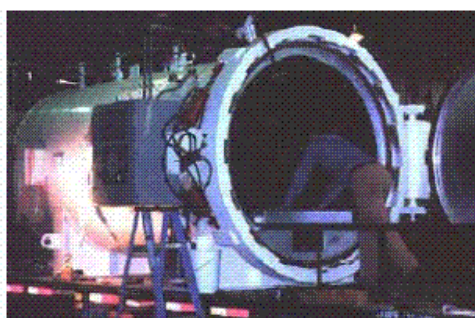
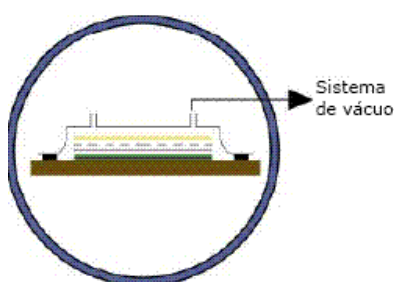


Figura A.3 - Processo de autoclave em embalagem a vácuo (Fonte: www.netcomposites.com).

- **Processo de enrolamento de filamentos - *Filament winding***

Este processo é utilizado na produção de material composto, na forma de corpos de revolução (tubos cilíndricos), onde a fibra é mergulhada num recipiente com resina, e enrolada na orientação desejada, num mandril de dimensões adequadas.

Após ter conseguido atingir o número de camadas considerado suficiente para se atingir a espessura desejada, a cura é realizada sob a temperatura ambiente, ou a uma temperatura mais elevada dentro de um forno. Em seguida, a peça é retirada do mandril.

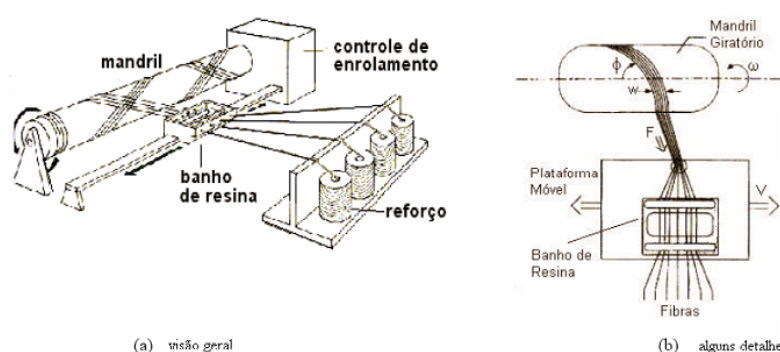


Figura A.4 - Processo de enrolamento de filamentos (Fonte: www.scielo.br).



Figura A.5 - Processo de enrolamento de filamentos (Fonte: www.gilgwang.com).

- **Processo de Pultrusão**

Utilizado na fabricação de materiais compostos, com perfis de seções transversais constantes como vigas, calhas, barras, tubos com furos, tal processo é considerado extremamente rápido, mas restrito a seções cujas formas não variam ao longo do comprimento. As fibras, após serem impregnadas em resina, são puxadas através de um mandril aquecido e com a seção transversal na forma desejada. O resultado final é um material com alta resistência mecânica.

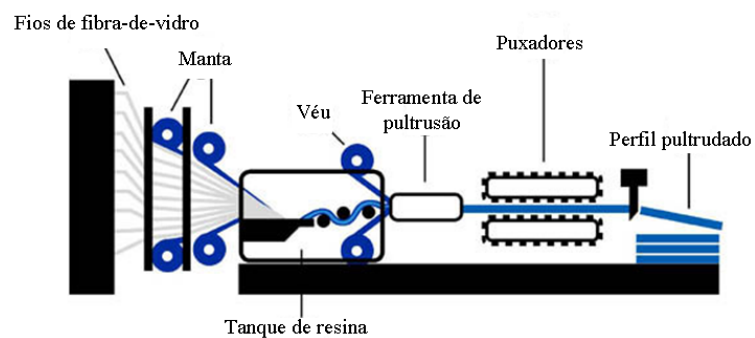


Figura A.6 - Processo de pultrusão (Fonte: www.csecomposites.com.br)

B

Processos de fabricação de vidro [39,76]

A matéria prima é composta principalmente pela sílica em forma de areia, componente básico para produção de qualquer vidro, cerca de 50%. Os materiais são misturados em grandes quantidades (a granel) e levados ao forno de fusão. Dentro do forno, a areia e os demais componentes se dissolvem, formando uma massa fundida em temperaturas que giram em torno de 1550°C. A temperatura desta massa decresce gradualmente, a partir da zona de fusão até os canais que alimentam as fieiras, onde a temperatura alcança 1250°C. Nesta temperatura, o vidro E atinge a viscosidade mais favorável à formação das fibras, permitindo a conformação das mesmas, com baixo índice de quebra.

A massa fundida de vidro flui para as bandejas de platina, as quais possuem milhares de pequenas aberturas tubulares, furadas com precisão, as fieiras. São através destas que a massa fundida passa, originando os filamentos. Esta corrente fina de vidro fundido é atravessa um orifício de diâmetro preciso, e então resfriada por água e ar, para garantir o diâmetro e criar um filamento. Logo após sua formação, os filamentos são coletados e agrupados em mechas e feixes, e então enrolados em bobinas.

Na manufatura, as fibras recebem, individualmente, um revestimento químico (sizing) que protege e lubrifica cada filamento, aumentando a resistência à abrasão e garantindo a integridade do feixe, visto que, sem este tratamento superficial, as fibras não serviriam de material de reforço. Outra função do tratamento é tomá-las compatíveis com a matriz a ser reforçada. Por último, as bobinas são aquecidas para secar o revestimento químico.

A figura B.1 traz um esquema reduzido do processo de fabricação das fibras de vidro:

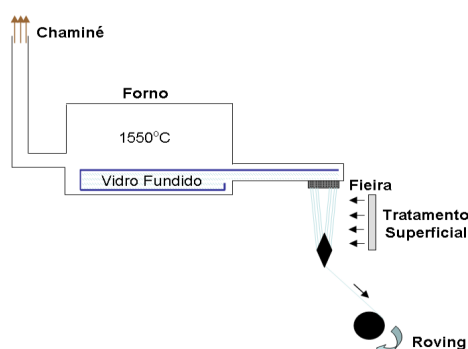


Figura B.1 - Figura esquemática do processo de fabricação da fibra de vidro.

C**Aparelho de teste de intemperismo QUV e câmara de teste fabricada [67]**

O aparelho de Teste de Intemperismo Acelerado QUV é uma câmara de teste de radiação UV/condensação, que simula os efeitos de degradação na superfície de produtos causados pela luz solar, chuva e orvalho. Os materiais são expostos em ciclos alternados de luz e umidade em temperaturas elevadas e controladas. Vide abaixo aparelho de teste de intemperismo QUV:



Figura C.1 – QUV

O efeito da luz solar é feita com lâmpadas fluorescentes ultra-violeta. Já o orvalho e chuva são simulados com condensação de umidade e borrifação (spray) de água. As condições podem ser variadas para simular os diversos ambientes.

O QUV pode reproduzir de modo acelerado a degradação que acontece nas superfícies expostas. Estes efeitos podem incluir: cor, brilho, quebras, rachaduras, redução de intensidade de força corante, oxidação etc.

CARACTERÍSTICAS DO QUV:

- Totalmente automático;
- Menu com diagnóstico;
- Operação 24h/7dias;
- Ciclos ilimitados;
- Memória para vários tipos de ciclos, conforme diferentes normas e definições do usuário;
- Acesso fácil a todos componentes do aparelho, permitindo reparos pelo usuário;
- Suportes de amostras, com anéis de fixação fáceis e rápidos para aplicar;

- Requer pouco espaço para instalação;
- Duração do teste ajustável para: término do teste, alarme sonoro, e mensagem no visor, (inclusive todos reunidos ou nenhum);
- Visor digital com as condições do teste e tempos: programação flexível, rápida, e fácil;
- Saída para computador (rede com IP);
- Usa água comum, pois a mesma é automaticamente destilada durante vaporização- processo de condensação;
- Aquecedor de longa durabilidade e de fácil limpeza;
- Nível de água controlada: fácil, visível e localizado externamente;
- Extremamente simples, máquina resistente e quase sem impedimentos de uso.

SIMULAÇÃO DA LUZ SOLAR:

A QUV usa lâmpadas fluorescentes ultravioleta para simular os efeitos de degradação da luz solar. Estas lâmpadas fluorescentes produzem mais facilmente a radiação ultravioleta do que lâmpadas incandescentes.

As lâmpadas diferem no total atingido de energia UV emitida e em sua distribuição espectral. A escolha da lâmpada depende da escolha da velocidade que o teste vai ser feito, o padrão e a degradação pretendida para assim realizar a simulação. Lâmpadas fluorescentes como, por exemplo, a chamada lâmpada de luz negra, apresenta desempenho semelhante à figura C.2 abaixo:

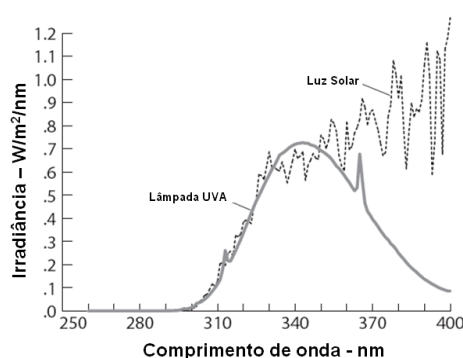


Figura C.2 – Comparação da luz solar versus lâmpada UVA

CÂMARA DE TESTE FABRICADA:

Desta forma, foi com base no funcionamento da máquina QUV, que se projetou a câmara de envelhecimento utilizada nesta tese.

Depois de projetada, tentou-se comprovar/medir a presença de radiação UV dentro da câmara, bem como relacionar o tempo de exposição na mesma versus o tempo de exposição ao sol, conforme demonstrado no Capítulo IV desta tese. A medição ideal seria a partir da utilização de um feixe de fibra óptica em quartzo, uma lente e um filtro também em quartzo, que permitiriam filtrar a radiação UV existente. Sua leitura poderia ser feita através da comunicação/interface com um software apropriado instalado em um computador. Devido a dificuldade de se encontrar tais materiais em quartzo ou radiômetros com faixa de leitura UV, utilizou-se uma metodologia simplificada, através do auxílio de filtros*, para determinação/estimativa da presença e/ou intensidade radioativa UVA e UVB dentro da câmara. Quando no processo de seleção do tipo de lâmpada a ser utilizada, foi considerada a hipótese de que tal lâmpada também emitisse ondas na faixa UVB, porém não havia inicialmente esta comprovação, apenas a informação por parte do fabricante das lâmpadas, tipo Luz Negra de Sylvania, que tratavam-se de lâmpadas com emissão predominantemente UVA .

Assim, a utilização dos filtros foi importante para demonstrar de maneira qualitativa a presença de radiação UVA, UVB e visível. Com auxílio de um medidor de potência óptica e um conjunto de filtros Russos, conforme figuras C.3, C.4, C.5 e C.6, foi possível realizar medições de potência da lâmpada dentro da câmara, correlacionando o valor medido versus o gráfico proposto por cada filtro utilizado.



Figura C.3 – Medidor de potência (Newport)



Figura C.4 – Sensor para medir a potência da luz

* Utilizados por empréstimo e recomendação feita pelo Professor Assistente Marco Cremona, do Departamento de Física da PUC-Rio, filtros e sensores (de procedência Russa) para medição qualitativa da potência da luz emitida pelas lâmpadas da câmara de teste.

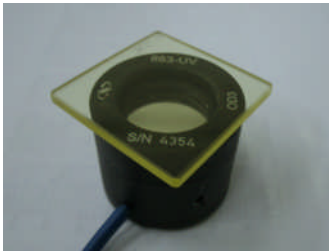


Figura C.5 – Sensor com filtro sobreposto



Figura C.6 – Filtros

Segue abaixo análise qualitativa desenvolvida com base no processo mencionado anteriormente. Vale salientar que em todos os gráficos analisados, a curva de referência adotada é a de número 2.

- Tipos de radiação presente na câmara:

As tabelas C.1, C.2 e C.3 abaixo apresentam os valores de potência medidos dentro e fora da câmara, com e sem a utilização dos filtros.

Filtro	Laboratório	Câmara	Variação		Gráficos Russos (% x comprimento de onda-nm)
	Potência (µW)	Potência (µW)	Potência (µW)	%	
Sem filtro	0,286	1,111	0,825	74	-
CC15	0,029	0,353	0,324	92	
ΦC6	0,038	0,404	0,367	91	
ΦC1	0,021	0,480	0,460	96	
CC5	0,046	0,168	0,122	73	

Tabela C.1 – Filtros

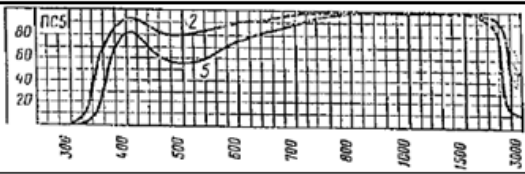
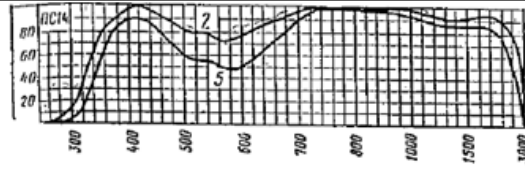
Filtro	Laboratório	Câmara	Variação		Gráficos Russos (% x comprimento de onda-nm)
	Potência (μW)	Potência (μW)	Potência (μW)	%	
Sem filtro	0,286	1,111	0,825	74	-
nC5	0,181	0,564	0,384	68	
nC14	0,185	0,808	0,623	77	

Tabela C.2 – Filtros

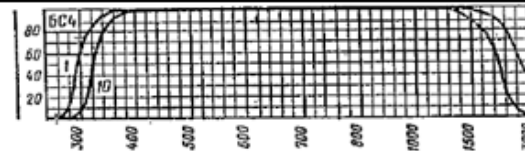
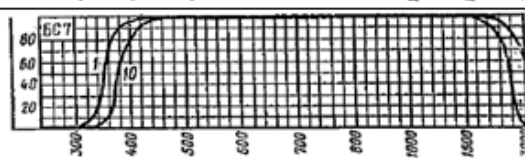
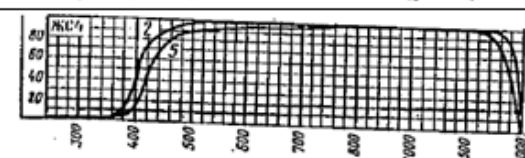
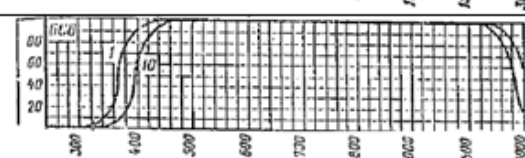
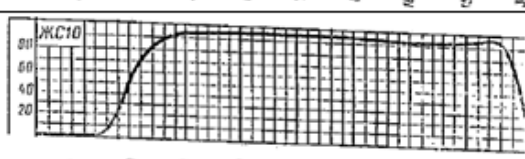
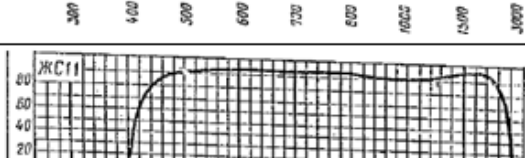
Filtro	Laboratório	Câmara	Variação		Gráficos Russos (% x comprimento de onda-nm)
	Potência (μW)	Potência (μW)	Potência (μW)	%	
σC4	0,269	1,036	0,767	74	
σC7	0,257	0,640	0,384	60	
ЖC4	0,244	0,345	0,101	29	
σC8	0,244	0,454	0,210	46	
ЖC10	0,252	0,404	0,152	38	
ЖC11	0,244	0,336	0,092	27	

Tabela C.3 – Filtros

Filtro	Laboratório	Câmara	Variação	
	Potência (μW)	Potência (μW)	Potência (μW)	%
Sem filtro	0,286	1,111	0,825	74
CC15	0,029	0,353	0,324	92
ΦC6	0,038	0,404	0,367	91
ΦC1	0,021	0,480	0,460	96
CC5	0,046	0,168	0,122	73
nC5	0,181	0,564	0,384	68
nC14	0,185	0,808	0,623	77
σC4	0,269	1,036	0,767	74
σC7	0,257	0,640	0,384	60
ЖC4	0,244	0,345	0,101	29
σC8	0,244	0,454	0,210	46
ЖC10	0,252	0,404	0,152	38
ЖC11	0,244	0,336	0,092	27

Tabela C.4 – Resumos das potências medidas dentro e fora da câmara

Analisando os gráficos acima e os valores descritos na tabela C.4, pode-se perceber nitidamente que ao se comparar as medições dentro da câmara versus as do laboratório (fora da câmara), fica evidente uma redução significativa da potência em praticamente todos eles. Isto provavelmente se deve ao fato de que, em geral, tais gráficos iniciam sua leitura na região UV, entre comprimentos de onda de 240nm a 400nm, combinado com a baixa intensidade ou inexistência de radiação UV no laboratório. É importante lembrar que no laboratório são utilizadas lâmpadas fluorescentes frias, onde de fato não é esperada a presença de comprimentos de onda na região UV.

Analisando os gráficos da tabela C.1 (CC15, ΦC1 e CC5), de curvas similares com divergências nos comprimentos de onda iniciais dos mesmos (300nm e 340nm), tem-se que o valor de potência lido para o filtro CC15 foi de 0,353 μW, para o filtro ΦC1 foi de 0,480 μW e 0,168 μW para o CC5. Tal diferença pode ser explicada basicamente pela variação 300 – 340nm referente ao início dos gráficos e mesmo pela maior amplitude apresentada nas curvas iniciais dos gráficos CC15 e ΦC1. Desta forma, se pode concluir, qualitativamente, a existência de ondas na faixa UVA.

Ainda na tabela C.1, analisando o gráfico CC15, no qual o mesmo apresenta uma limitação de radiação mais próxima das regiões de UVA+UVB, pode-se estimar que:

Relação UVA+UVB dentro da câmara versus laboratório ≈

$$\frac{\frac{\text{Potência dentro da câmara}}{\% \text{ do comprimento de onda}}}{\frac{\text{Potência dentro do laboratório}}{\% \text{ do comprimento de onda}}} \approx \frac{0,353}{0,029} \approx 12$$

Isto seria o mesmo que dizer que a radiação UVA+UVB emitida pela câmara fabricada é pelo menos 12 vezes maior que a radiação emitida pela lâmpada fluorescente do laboratório. Somado a isto, pode-se ainda dizer que pelo menos 35% da potência dentro da câmara esta na região espectral UVA+UVB:

Porcentagem de radiação UVA+UVB dentro da câmara =

$$\frac{\frac{\text{Potência} \cdot \text{dentro} \cdot \text{da} \cdot \text{câmara}}{\% \cdot \text{do} \cdot \text{comprimento} \cdot \text{de} \cdot \text{onda}}}{\text{Potência} \cdot \text{total} \cdot \text{dentro} \cdot \text{da} \cdot \text{câmara}} \cdot 100 = \frac{0,353}{1,111} \cdot 100 = 35\%$$

Novamente, analisando os gráficos da tabela C.2 (nC5 e nC14), de curvas também similares com divergências nos comprimentos de onda iniciais dos mesmos (300nm e 240nm respectivamente), pode-se perceber um aumento de potência de 0,564 μW para 0,808 μW . Este aumento deve-se basicamente a variação do comprimento de onda inicial dos gráficos, bem como a variação da porcentagem de absorção de 90% para 100% no trecho de 400nm. Desta forma, outra vez, pode-se qualitativamente perceber a presença de radiação UV, porém neste caso, na faixa UVB.

Com base nesta análise, fica evidenciada a presença de radiação UVA, UVB e luz visível dentro da câmara.

- Estimativa da potência por tipo de radiação dentro da câmara:

Analisando os gráficos da tabela C.3 (σC4 , σC7 , $\mathcal{K}\text{C4}$), de curvas similares com divergências nos comprimentos de onda iniciais dos mesmos (260nm, 300nm e 340nm, respectivamente), e considerando que a curva do gráfico $\mathcal{K}\text{C4}$ realmente apresenta contribuição significativa quando toma-se ascendente, ou seja, quando o comprimento de onda se aproxima de 380 – 400nm, pode-se estimar qualitativamente que a parte correspondente a luz visível, acima de 400nm, seria aproximadamente o valor de potência lida, 0,345 μW . Sabendo que a potência total lida inicialmente, sem nenhum filtro, foi de 1,111 μW , a parte correspondente a UVA e UVB seria de aproximadamente 0.766 μW .

Subtraindo-se os gráficos dos filtros σC7 - σC4 , onde o primeiro inicia-se 320nm e o segundo em 280nm, tem-se assim a potência referente a região UVB:

$$\sigma_{C7} - \sigma_{C4} =$$

$$Pot. na. câmara com filtro \sigma_{C7} - Pot. na. câmara com filtro \sigma_{C4} = 1,036 - 0,640 = 0,396 \mu W$$

Logo, em resumo temos os seguintes valores aproximados para cada região:

- Luz Visível: 0,345 μW
- Radiação UVA+UVB: 1,111 - 0,345 = 0,766 μW
- Radiação UVB: $\sigma_{C7} - \sigma_{C4} = 1,036 - 0,640 = 0,396 \mu W$
- Radiação UVA: 0,766 - 0,396 = 0,370 μW
- Radiação Total: 0,345 + 0,370 + 0,396 = 1,111 μW

D

Resultados complementares dos ensaios realizados

Este apêndice visa apresentar os resultados individuais de todos os corpos de prova testados para nos ensaios de tração.

D.1

Resultados complementares dos ensaios de tração

A Tabela D.1 resume os testes de tração realizados nos corpos de prova submetidos à radiação UV.

Ensaio de Tração						
CP	Tipo de Envelhecimento	Tempo de exposição	Tempo de exp. (horas)	Deformação Máxima (mm/mm)	Tensão de ruptura (Mpa)	Módulo de Elasticidade
1	UVA	1ª semana	168	0,008	289	23189
2	UVA			0,020	324	21599
5	UVA	3ª semana	504	0,012	263	23176
6	UVA			0,016	330	21429
9	UVA	5ª semana	840	0,018	333	21178
10	UVA			0,016	340	21533
13	UVA	10ª semana	1680	0,013	299	20174
14	UVA			0,018	341	20261
Desvio Padrão					28	1136

Tabela D.1 – Resultados dos ensaio de tração – Radiação UV.

Abaixo serão apresentados os gráficos de tensão x deformação para cada corpo de prova.

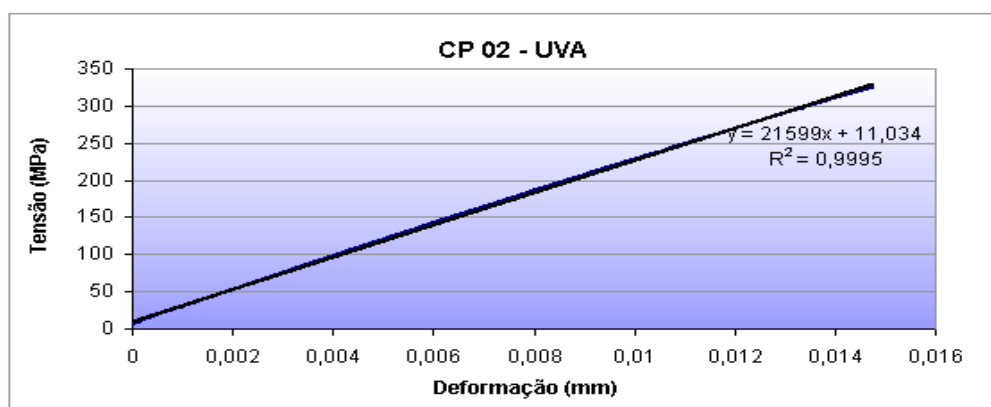


Gráfico D.1 – Ensaio de tração – CP 02

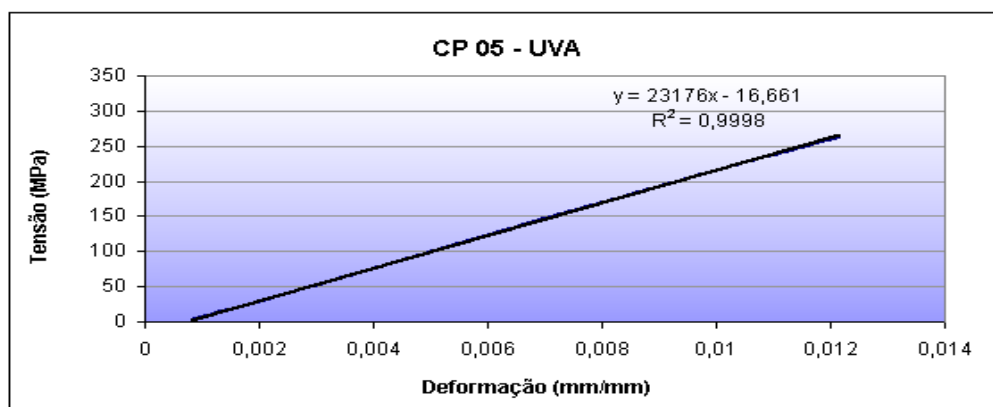


Gráfico D.2 – Ensaio de tração – CP 05

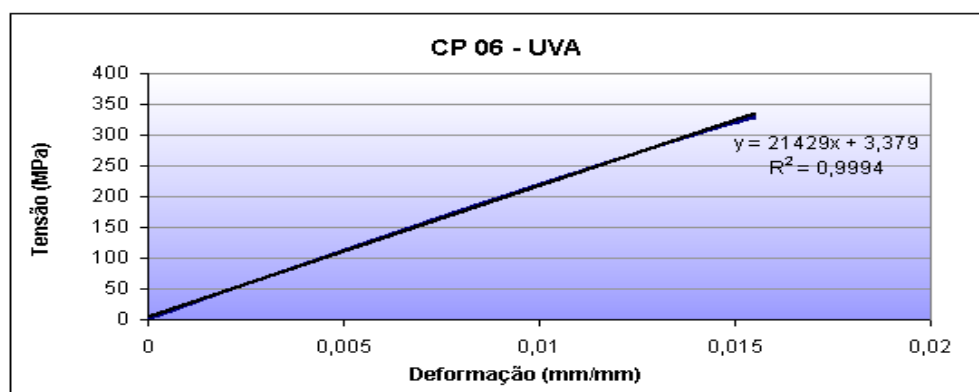


Gráfico D.3 – Ensaio de tração – CP 06

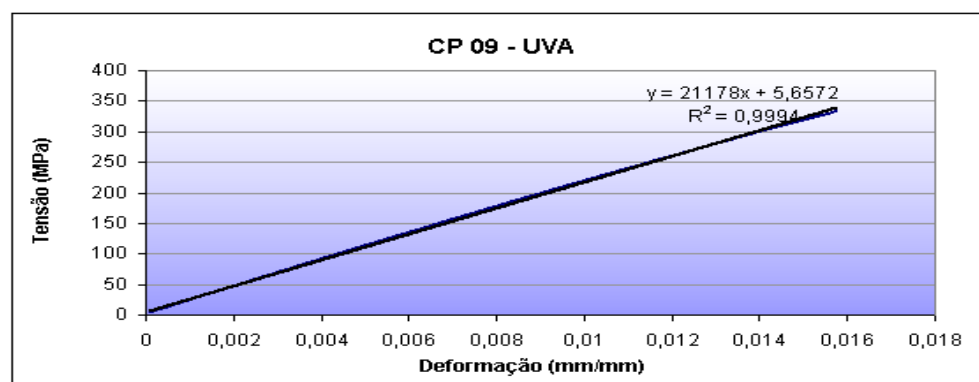


Gráfico D.4 – Ensaio de tração – CP 09

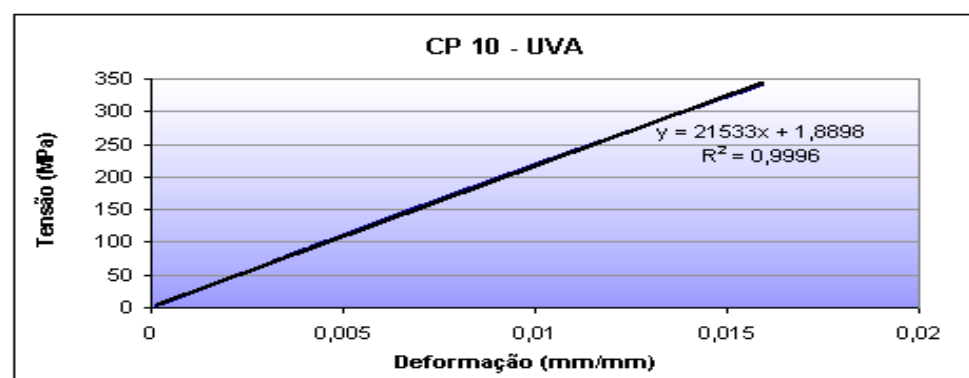


Gráfico D.5 – Ensaio de tração – CP 10

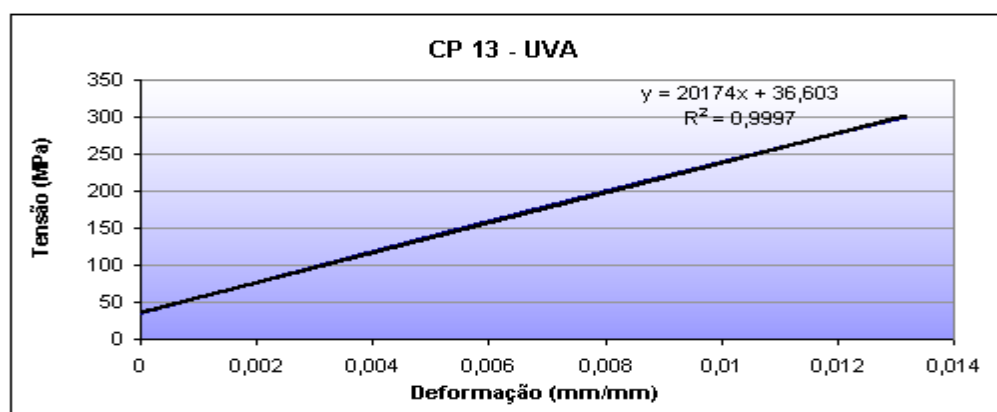


Gráfico D.6 – Ensaio de tração – CP 13

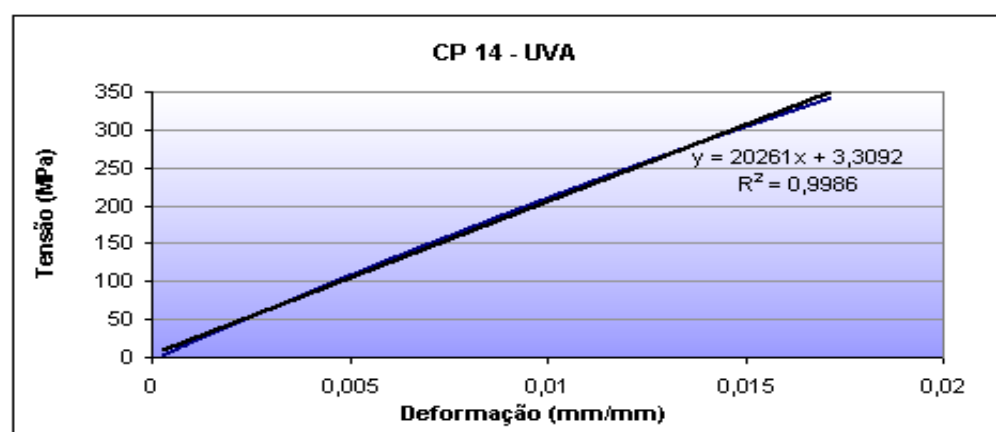


Gráfico D.7 – Ensaio de tração – CP 14

A Tabela D.2 resume os testes de tração realizados nos corpos de prova submetidos à temperatura de 70°C:

Ensaio de Tração						
CP	Tipo de Envelhecimento	Tempo de exposição	Tempo de exp. (horas)	Deformação Máxima (mm/mm)	Tensão de ruptura (Mpa)	Módulo de Elasticidade
17	Temp. 70°C	1ª semana	138	0,014	301	21334
18	Temp. 70°C			0,016	306	20276
21	Temp. 70°C	3ª semana	504	0,016	307	21212
23	Temp. 70°C	5ª semana	840	0,014	294	20682
25	Temp. 70°C	10ª semana	1680	0,018	287	21361
26	Temp. 70°C			0,014	294	21323
29	Temp. 70°C	12ª semana	2016	0,012	225	21383
Desvio Padrão e Média					29	431

Tabela D.2 – Resultados dos ensaio de tração – Temperatura de 70°C

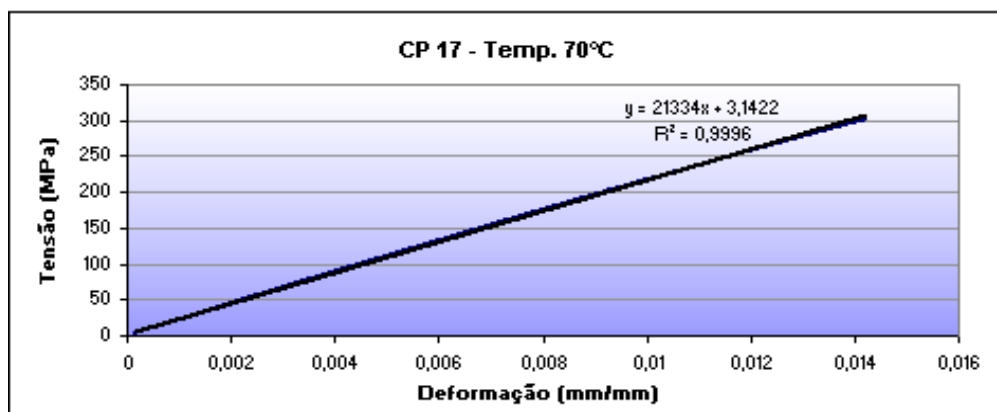


Gráfico D.8 – Ensaio de tração – CP 17

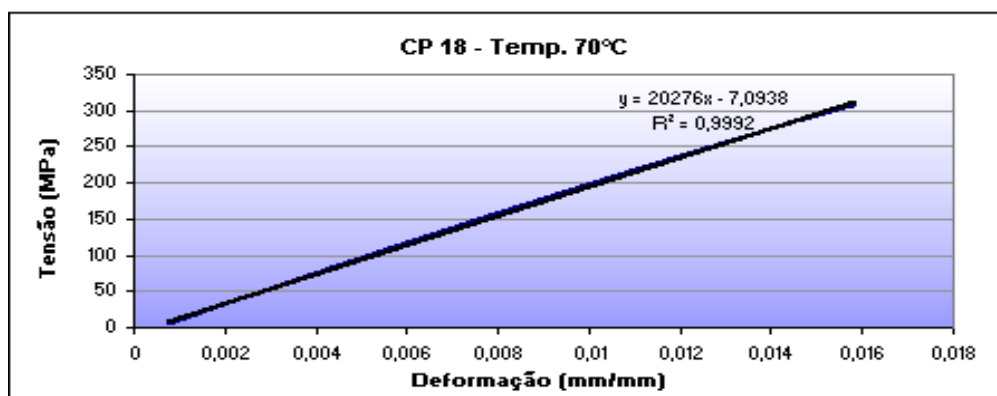


Gráfico D.9 – Ensaio de tração – CP 18

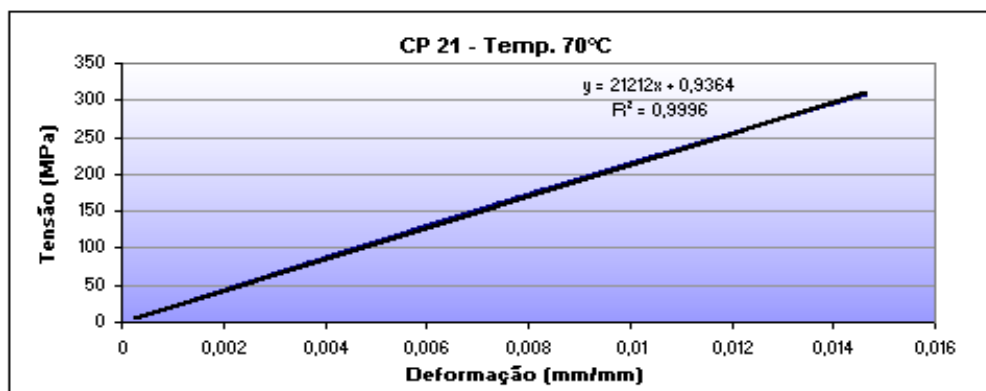


Gráfico D.10 – Ensaio de tração – CP 21

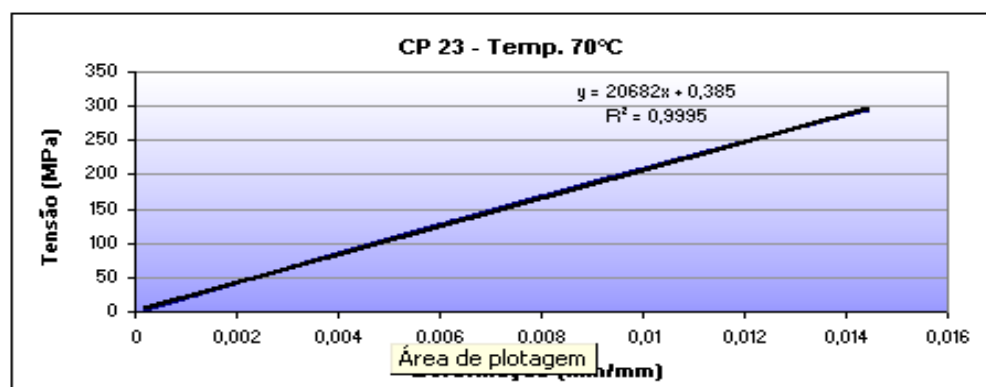


Gráfico D.11 – Ensaio de tração – CP 23

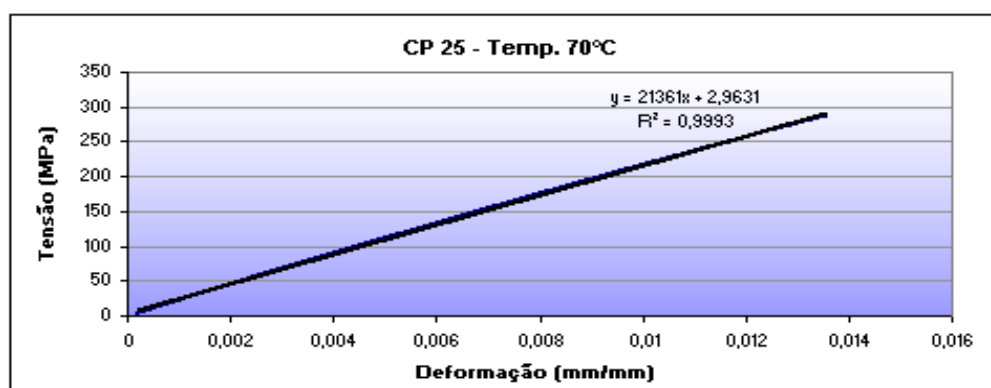


Gráfico D.12 – Ensaio de tração – CP 25

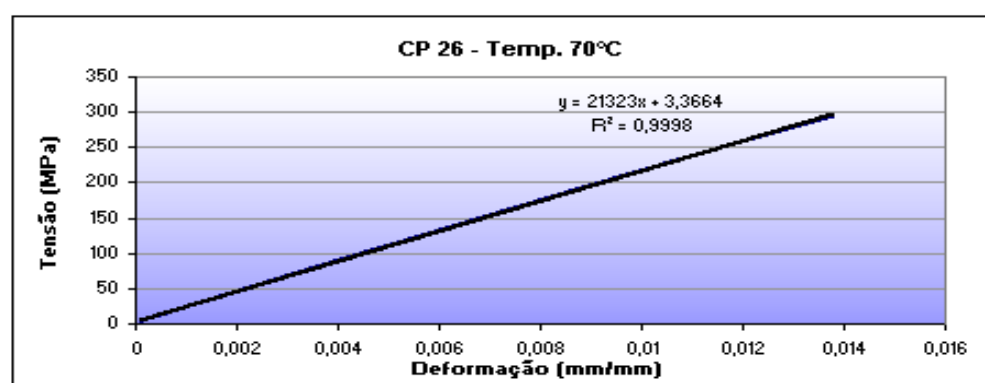


Gráfico D.13 – Ensaio de tração – CP 26

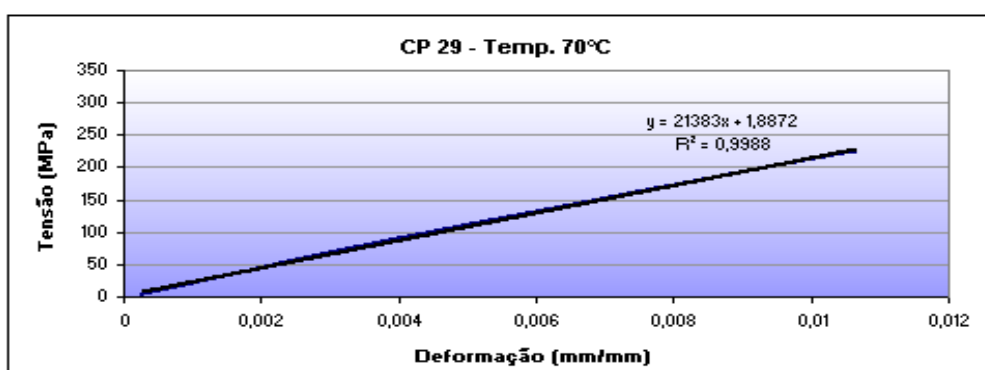


Gráfico D.14 – Ensaio de tração – CP 29

A Tabela D.3 resume os testes de tração realizados nos corpos de prova submetidos à água a temperatura de 70°C.

Ensaio de Tração						
CP	Tipo de Envelhecimento	Tempo de exposição	Tempo de exp. (horas)	Deformação Máxima (mm/mm)	Tensão de ruptura (Mpa)	Módulo de Elasticidade
31	Água a temp. 70°C	1ª semana	138	0,015	318	20919
32	Água a temp. 70°C			0,016	327	20940
35	Água a temp. 70°C	3ª semana	504	0,017	284	21128
37	Água a temp. 70°C	5ª semana	840	0,019	267	21137
38	Água a temp. 70°C			0,015	280	21196
41	Água a temp. 70°C	10ª semana	1680	0,014	292	20925
42	Água a temp. 70°C			0,013	285	21707
44	Água a temp. 70°C	12ª semana	2016	0,013	282	20680
Desvio Padrão e Média					20	303

Tabela D.3 – Resultados dos ensaios de tração – Água a temperatura de 70°C

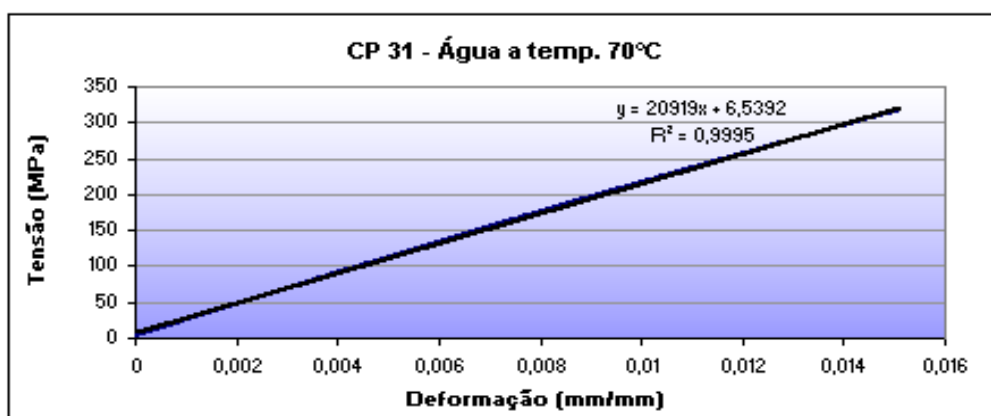


Gráfico D.15 – Ensaio de tração – CP 31

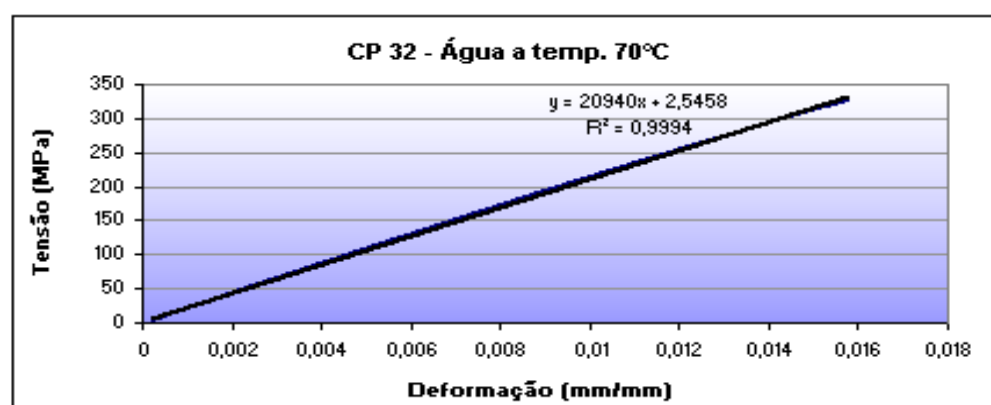


Gráfico D.16 – Ensaio de tração – CP 32

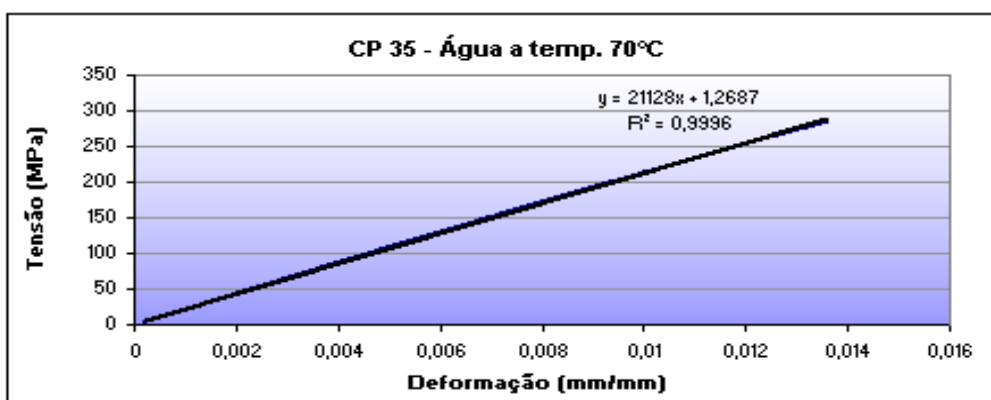


Gráfico D.17 – Ensaio de tração – CP 35

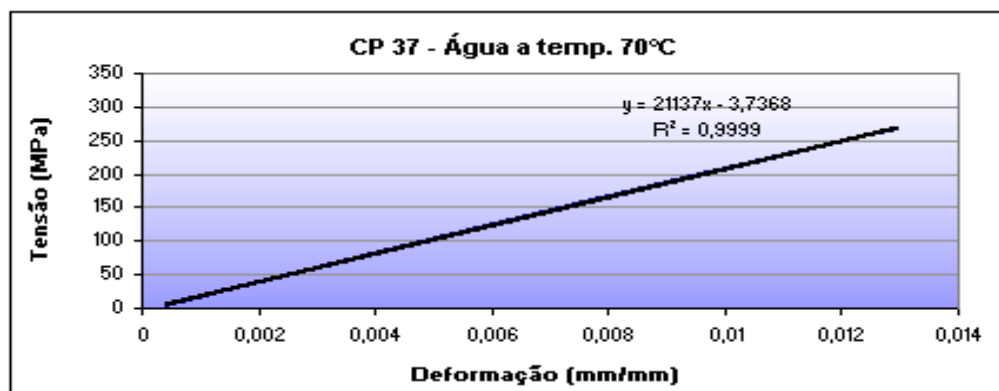


Gráfico D.18 – Ensaio de tração – CP 37

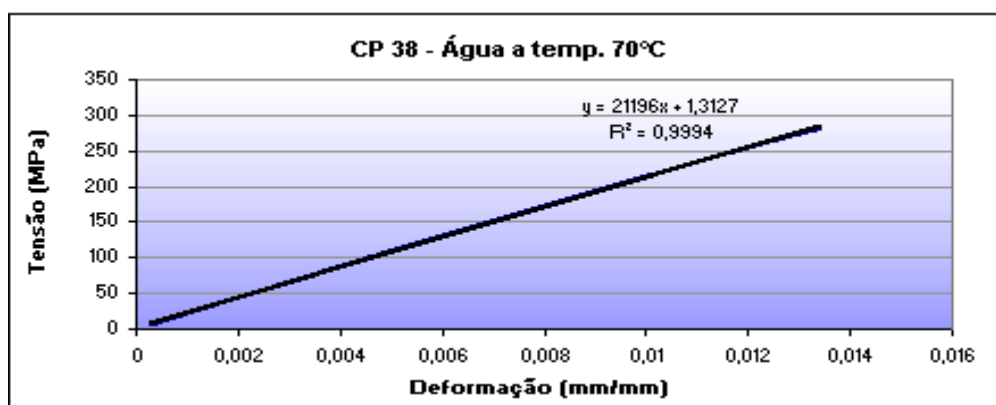


Gráfico D.19 – Ensaio de tração – CP 38

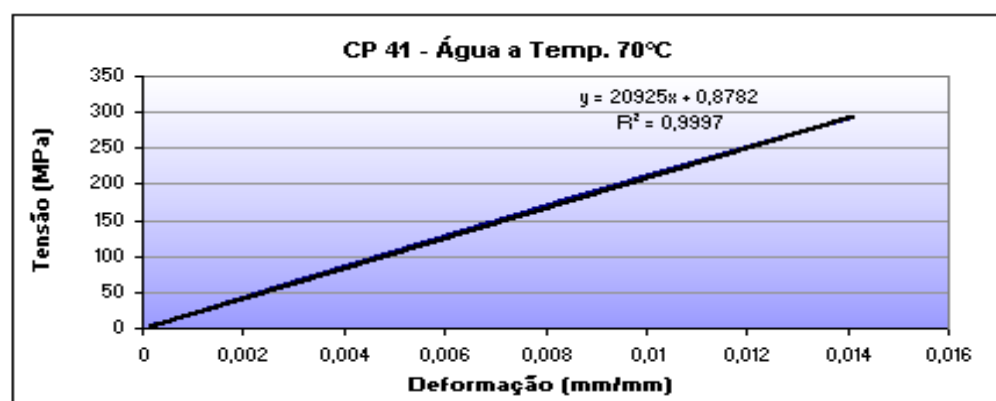


Gráfico D.20 – Ensaio de tração – CP 41

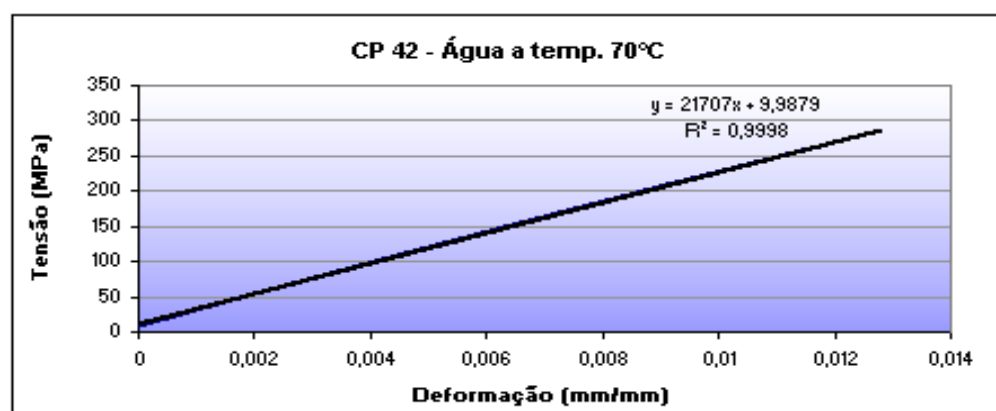


Gráfico D.21 – Ensaio de tração – CP 42

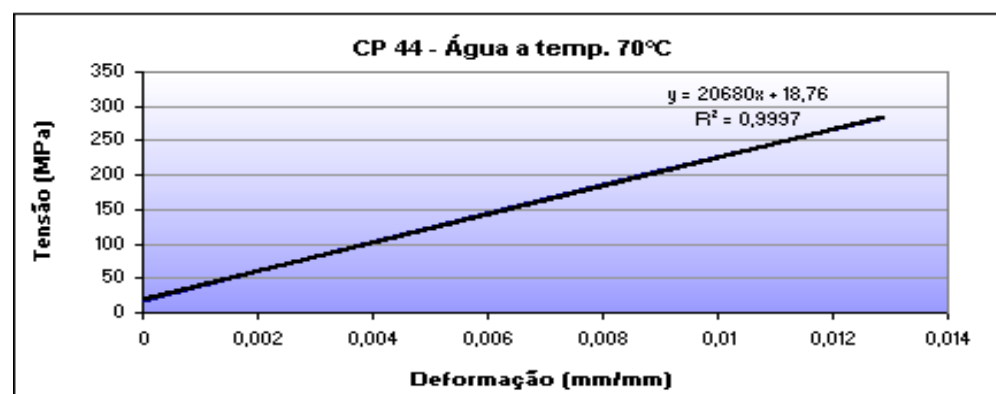


Gráfico D.22 – Ensaio de tração – CP 44

D.2

Resultados complementares dos ensaios de flexão

A Tabela D.4 resume os testes de flexão realizados nos corpos de prova não submetidos a ensaios de envelhecimento:

Ensaio de Flexão					
CP	Tipo de Envelhecimento	Tempo de exposição	Tempo de exp.(horas)	Deformação Máxima (mm/mm)	Tensão de ruptura (Mpa)
48	Não envelhecido	0ª semana	0ª semana	0,050	246
49	Não envelhecido			0,050	273
Desvio Padrão					19
Fabricante	Não envelhecido	0 semana		-	366

Tabela D.4 – Resultados dos ensaios de flexão – Cp não envelhecidos

Abaixo serão apresentados os gráficos de tensão x deformação para cada corpo de prova.

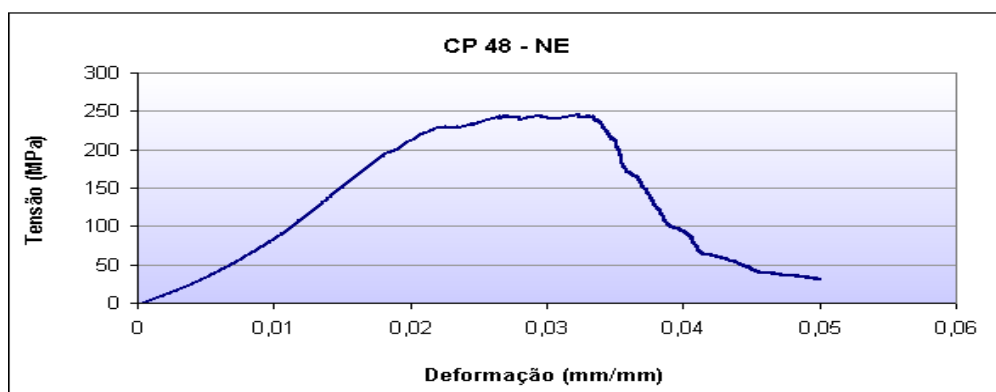


Gráfico D.23 – Ensaio de flexão – CP 48

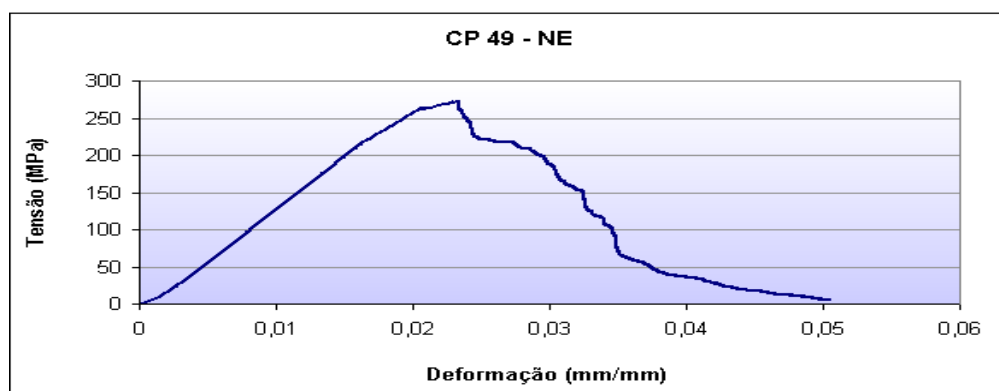


Gráfico D.24 – Ensaio de flexão – CP 49

A Tabela D.5 resume os testes de flexão realizados nos corpos de prova submetidos à exposição de radiação.

Ensaio de Flexão					
CP	Tipo de Envelhecimento	Tempo de exposição	Tempo de exp.(horas)	Deformação Máxima (mm/mm)	Tensão de ruptura (Mpa)
3	UVA	1ª semana	168	0,050	249
4	UVA			0,052	289
7	UVA	3ª semana	504	0,050	250
8	UVA			0,050	239
11	UVA	5ª semana	840	0,050	259
12	UVA			0,050	275
15	UVA	10ª semana	1680	0,050	266
16	UVA			0,050	284
Desvio Padrão				0,001	18

Tabela D.5 – Resultados dos ensaios de flexão – Radiação UV

Abaixo serão apresentados os gráficos de tensão x deformação para cada corpo de prova:

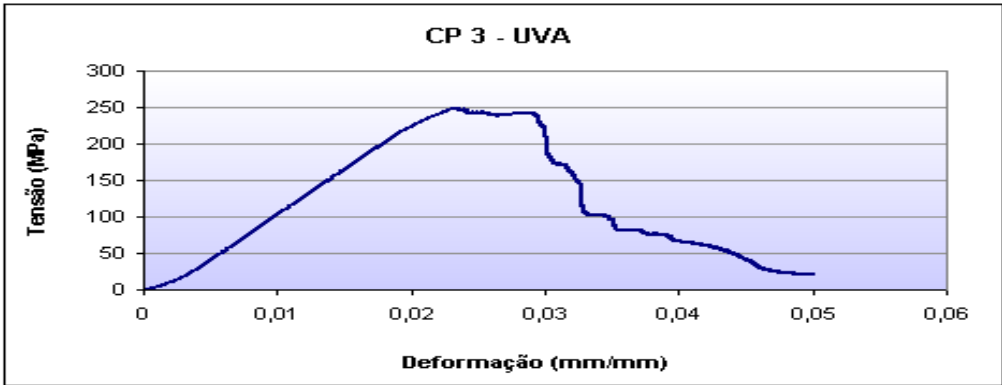


Gráfico D.25 – Ensaio de flexão – CP 03

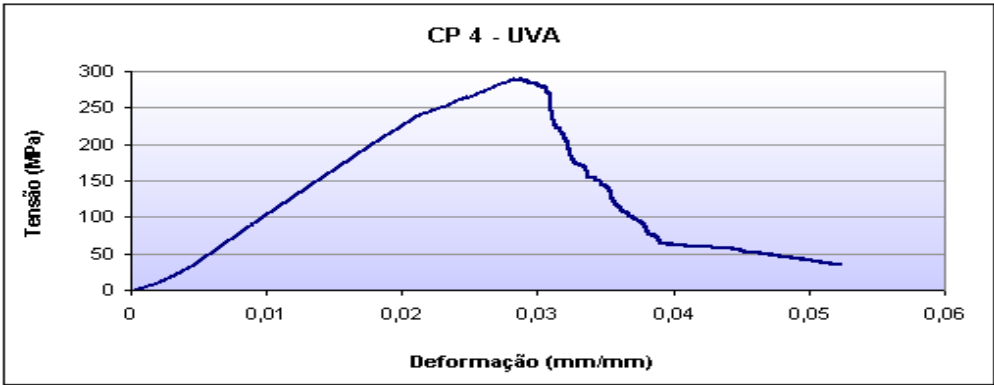


Gráfico D.26 – Ensaio de flexão – CP 04

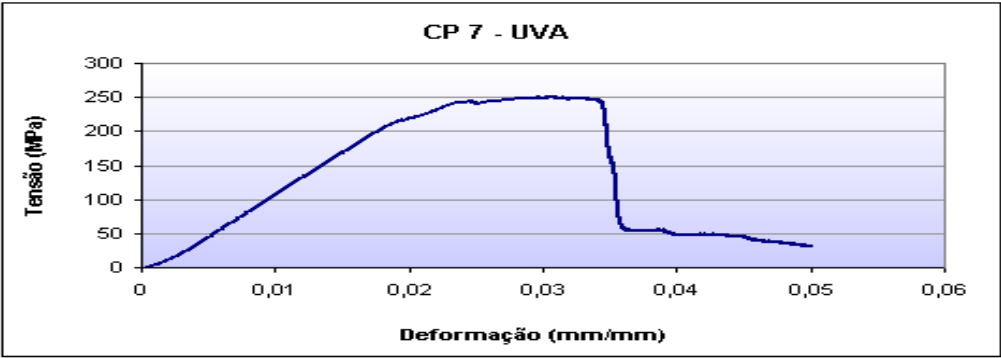


Gráfico D.27 – Ensaio de flexão – CP 07

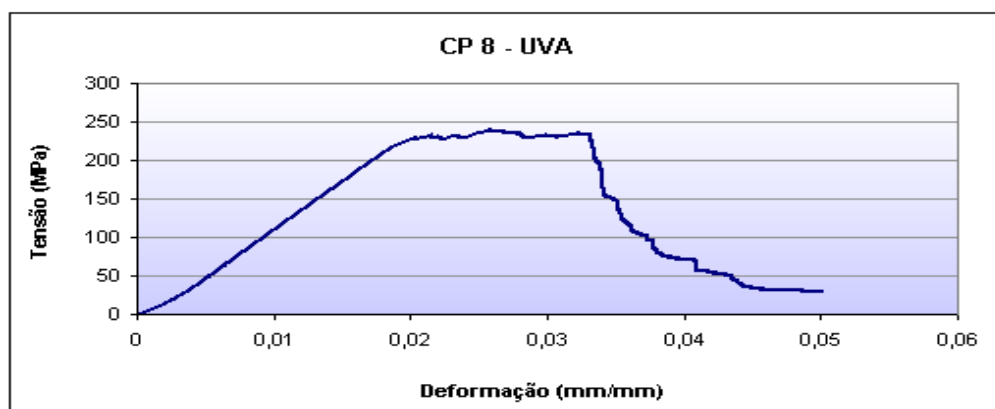


Gráfico D.28 – Ensaio de flexão – CP 08

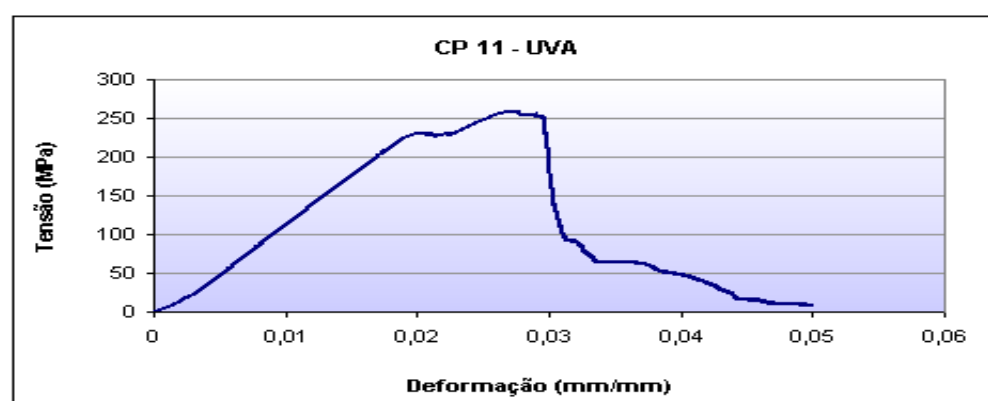


Gráfico D.29 – Ensaio de flexão – CP 11

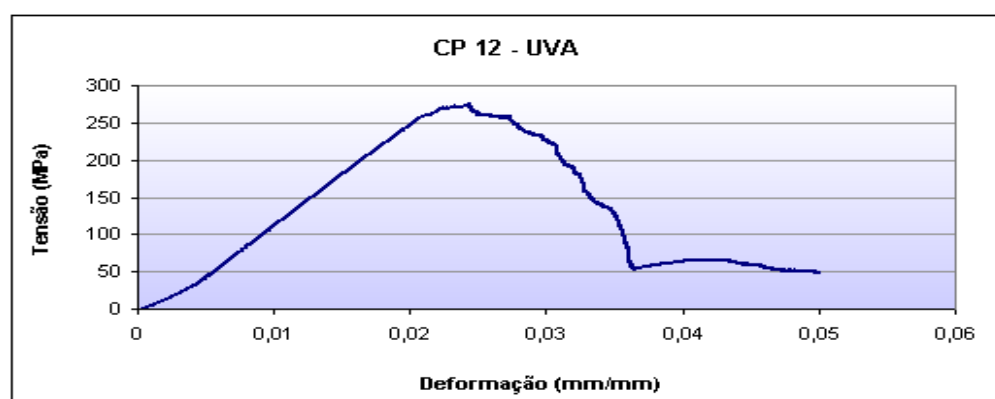


Gráfico D.30 – Ensaio de flexão – CP 12

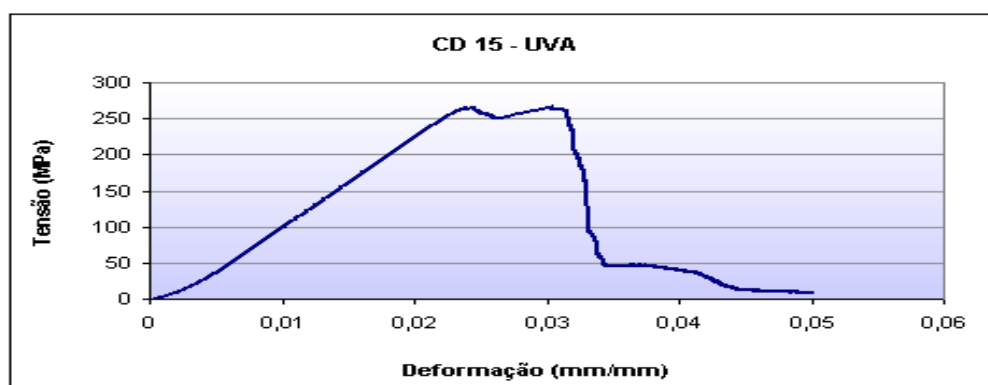


Gráfico D.31 – Ensaio de flexão – CP 15

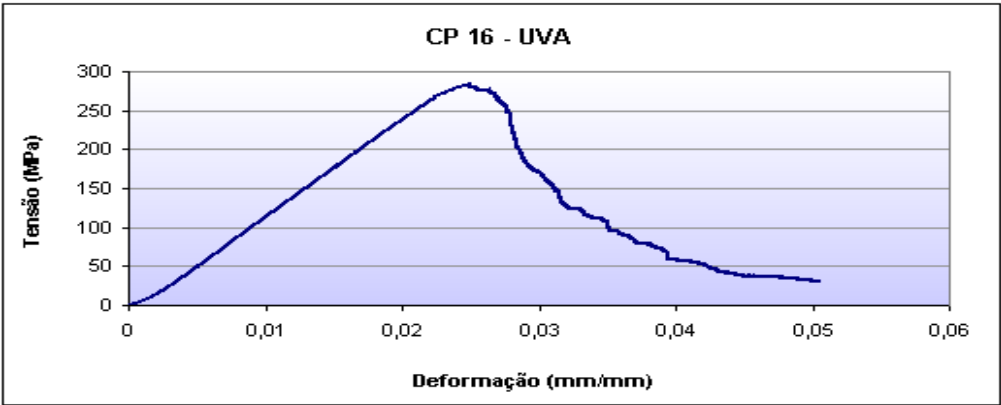


Gráfico D.32 – Ensaio de flexão – CP 16

A Tabela D.6 resume os testes de flexão realizados nos corpos de prova submetidos à temperatura de 70°C.

Ensaio de Flexão					
CP	Tipo de Envelhecimento	Tempo de exposição	Tempo de exp.(horas)	Deformação Máxima (mm/mm)	Tensão de ruptura (Mpa)
19	Temp. 70°C	1ª semana	168	0,050	246
20	Temp. 70°C			0,050	226
22	Temp. 70°C	3ª semana	504	0,050	244
24	Temp. 70°C	5ª semana	840	0,050	245
27	Temp. 70°C	10ª semana	1680	0,050	236
28	Temp. 70°C			0,050	214
30	Temp. 70°C	12ª semana	2016	0,050	246
Desvio Padrão				0,000	12

Tabela D.6 – Resultados dos ensaios de flexão – Temperatura a 70°C

Abaixo serão apresentados os gráficos de tensão x deformação para cada corpo de prova:

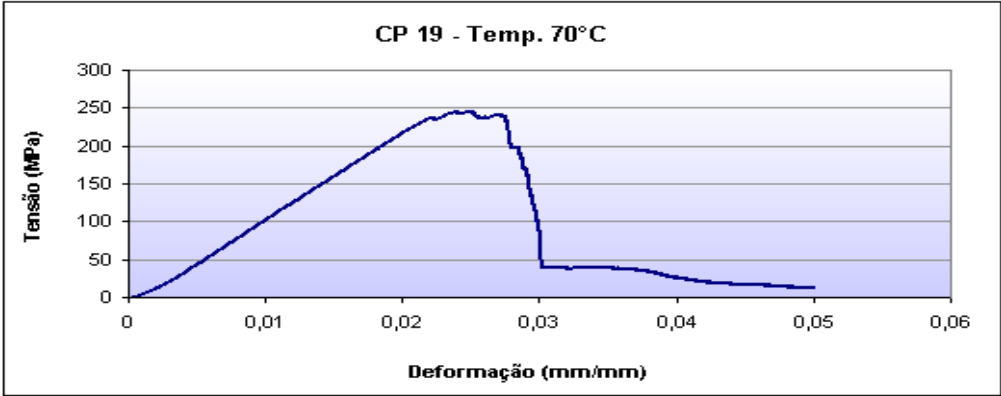


Gráfico D.33 – Ensaio de flexão – CP 19

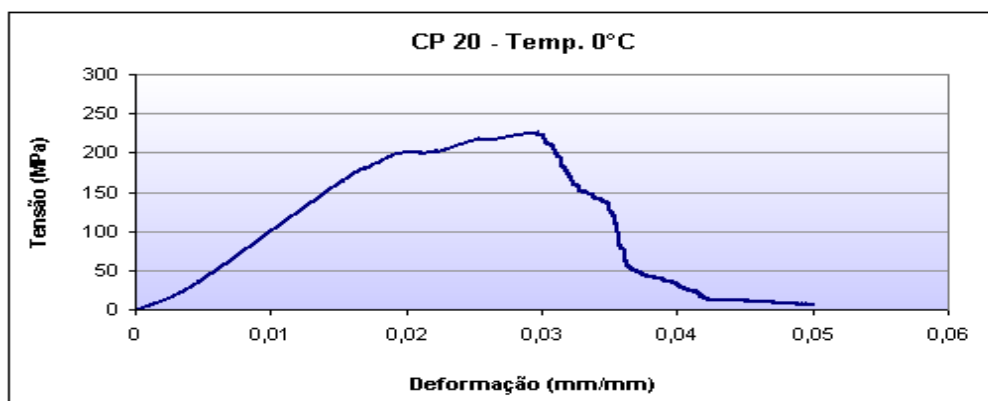


Gráfico D.34 – Ensaio de flexão – CP 20

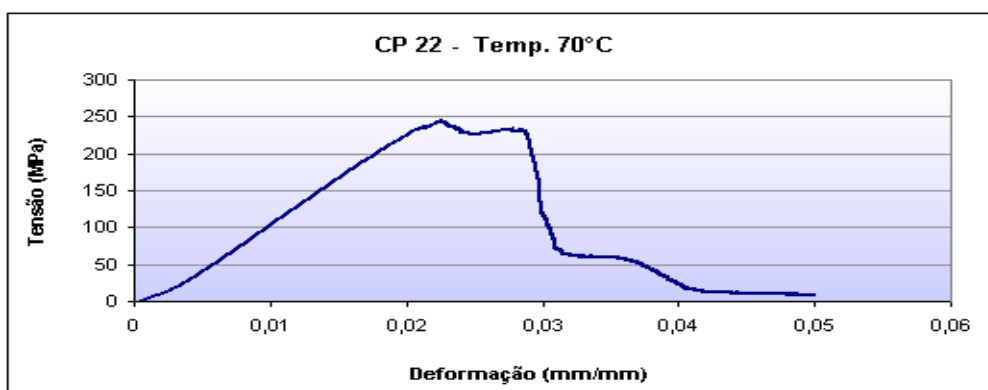


Gráfico D.35 – Ensaio de flexão – CP 22

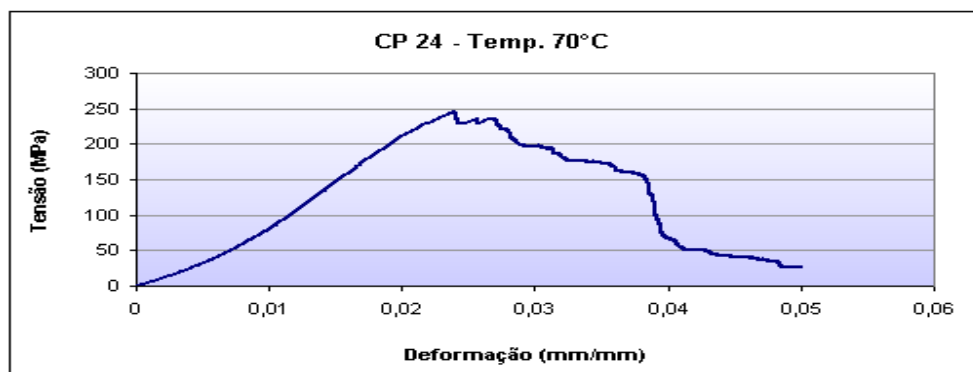


Gráfico D.36 – Ensaio de flexão – CP 24

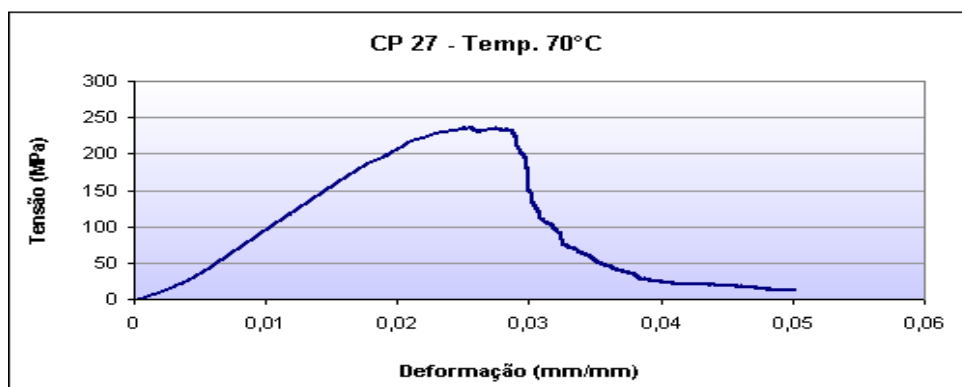


Gráfico D.37 – Ensaio de flexão – CP 27

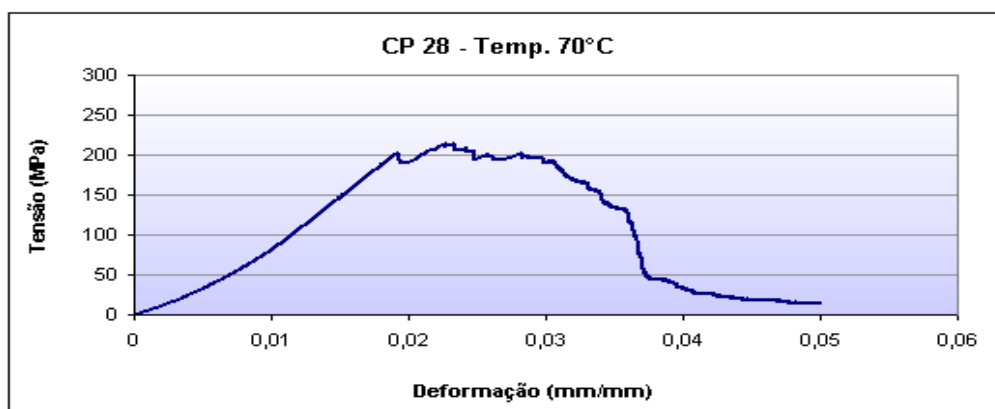


Gráfico D.38 – Ensaio de flexão – CP 28

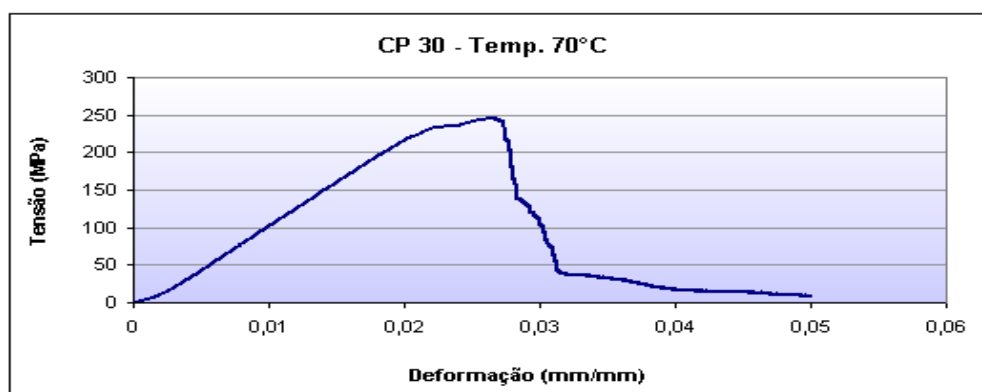


Gráfico D.39 – Ensaio de flexão – CP 30

A Tabela D.7 resume os testes de flexão realizado nos corpos de prova submetidos à água a temperatura de 70°C.

Ensaio de Flexão					
CP	Tipo de Envelhecimento	Tempo de exposição	Tempo de exp.(horas)	Deformação Máxima (mm/mm)	Tensão de ruptura (Mpa)
33	Água a temp. 70°C	1ª semana	168	0,050	256
34	Água a temp. 70°C			0,043	245
36	Água a temp. 70°C	3ª semana	504	0,050	246
39	Água a temp. 70°C			0,050	230
40	Água a temp. 70°C	5ª semana	840	0,050	229
43	Água a temp. 70°C			0,050	214
45	Água a temp. 70°C	12ª semana	2016	0,050	218
Desvio Padrão				0,003	15

Tabela D.7 – Resultados dos ensaios de flexão – Água a Temperatura de 70°C

Abaixo serão apresentados os gráficos de tensão x deformação para cada corpo de prova:

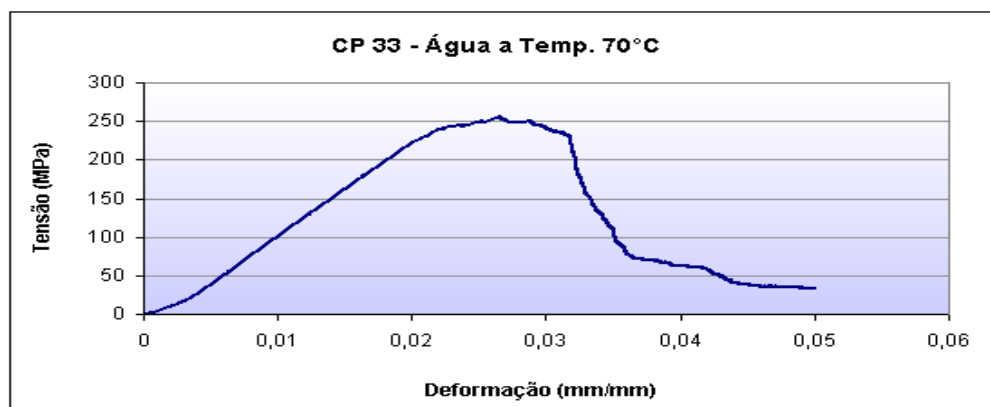


Gráfico D.40 – Ensaio de flexão – CP 33

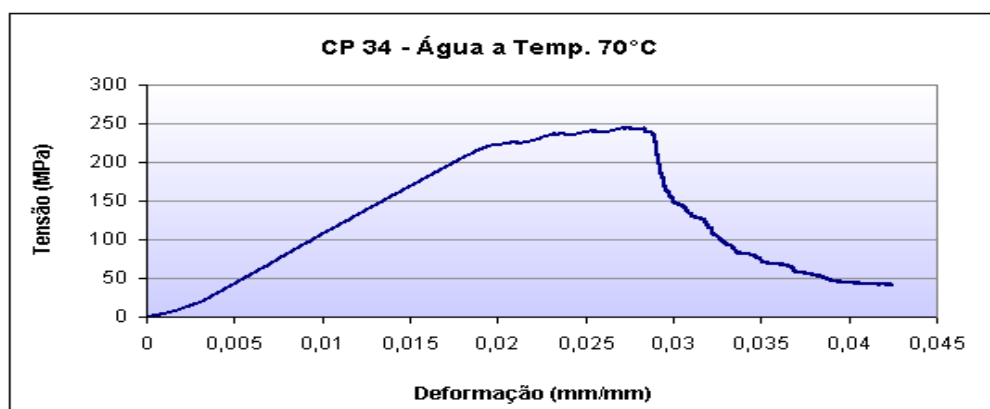


Gráfico D.41 – Ensaio de flexão – CP 34

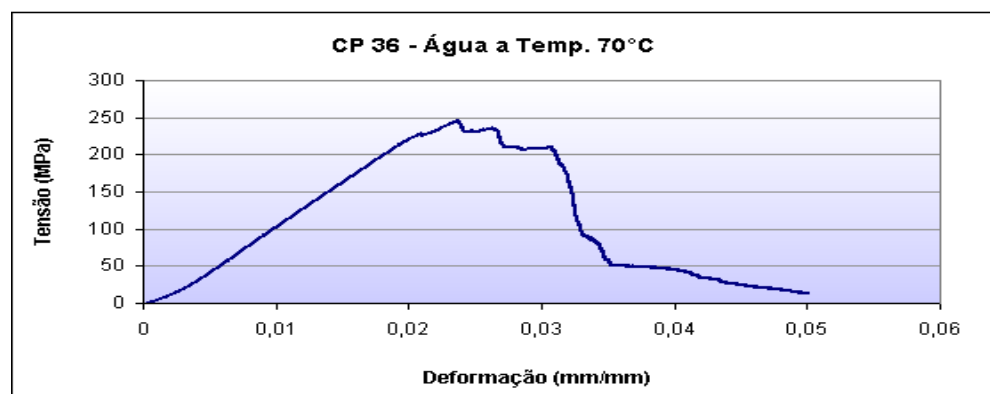


Gráfico D.42 – Ensaio de flexão – CP 36

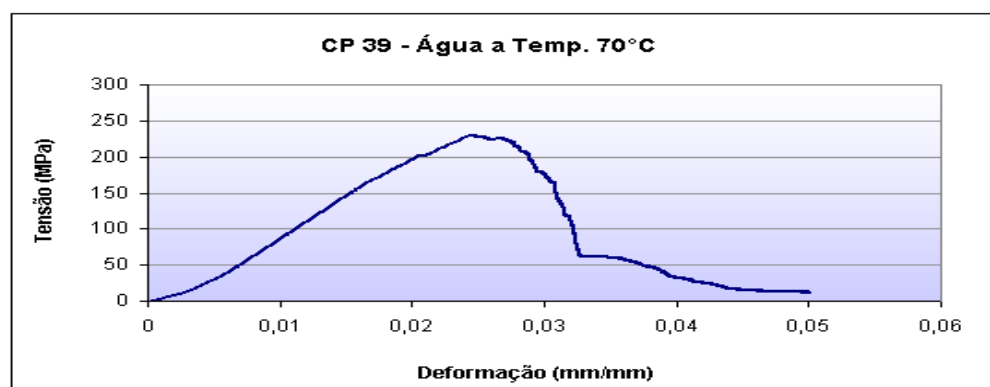


Gráfico D.43 – Ensaio de flexão – CP 39

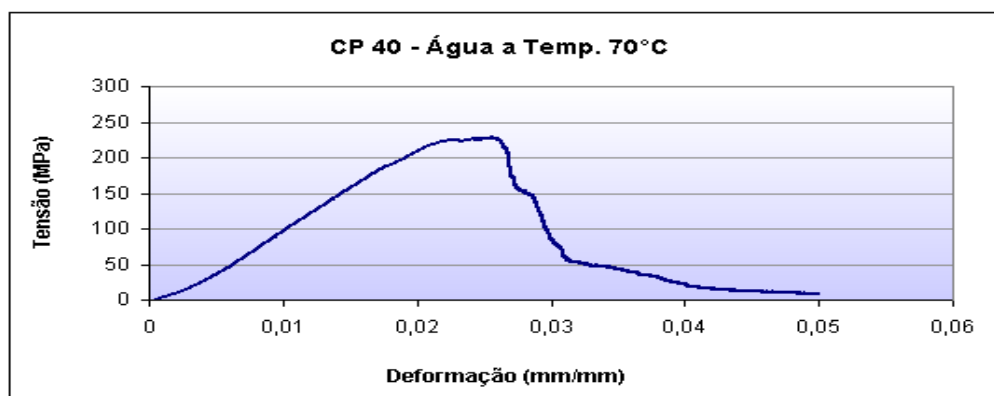


Gráfico D.44 – Ensaio de flexão – CP 40

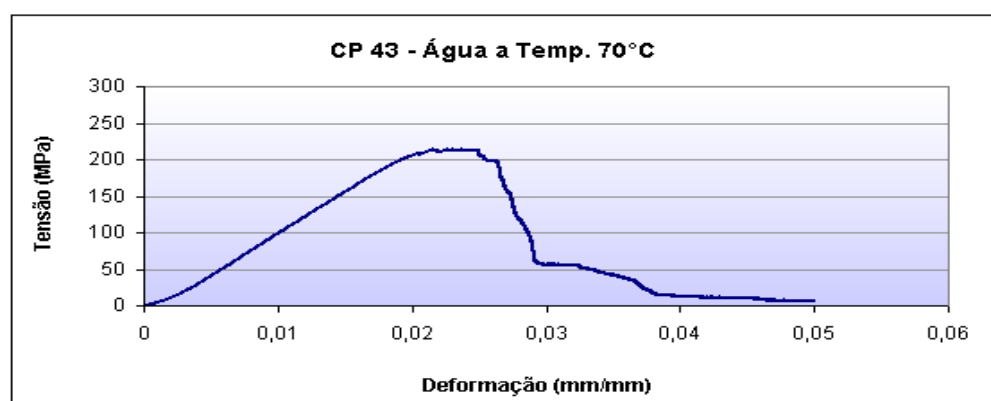


Gráfico D.45– Ensaio de flexão – CP 43

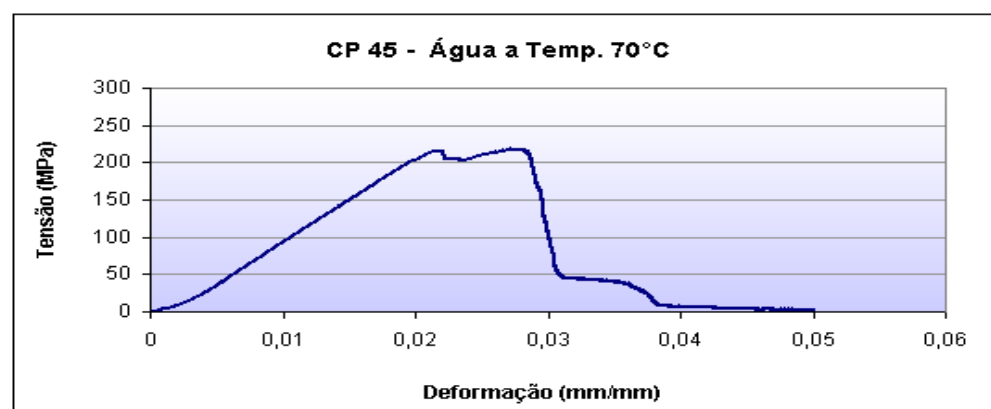


Gráfico D.46– Ensaio de flexão – CP 45

E**Modelagem matemática [4]**

Conforme já mencionado, esta modelagem matemática baseia-se na teoria de cilindros de parede espessa mediante a identificação de três regiões de comportamento. No seu desenvolvimento são utilizadas equações da elasticidade para dutos de parede espessa, para assim obter equações que descrevem o comportamento elástico do duto com reparo, as quais também são utilizadas no regime plástico devido ao modelo de encruamento linear adotado. As equações utilizadas são:

e = espessura do reparo

t = espessura nominal do duto

r = raio interno

P = pressão interna

E_d = módulo de elasticidade do duto

E_{mt} = módulo de elasticidade tangencial da mescla reparo-adesivo

E_{mr} = módulo de elasticidade radial da mescla reparo-adesivo

E_t = módulo de elasticidade tangencial do reparo

E_r = módulo de elasticidade radial do reparo

E_c = módulo de elasticidade do adesivo

μ_d = coeficiente de Poisson do duto

μ_{mtr} = coeficiente de Poisson tangencial radial da mescla reparo-adesivo

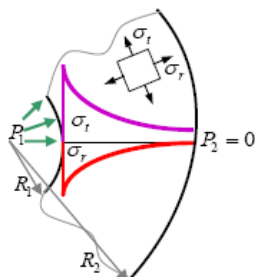
E_{rt} = módulo de elasticidade tangencial do reparo

E_{rr} = módulo de elasticidade radial do reparo

μ_c = coeficiente de Poisson do adesivo

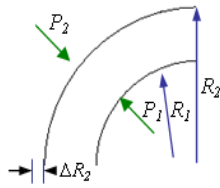
μ_{tr} = coeficiente de Poisson tangencial radial do reparo

- Tensão circunferencial num duto de parede espessa:



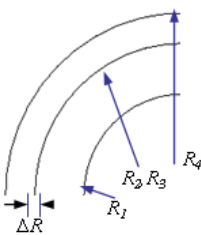
$$\sigma_c = \frac{P_1 \cdot R_1^2 \cdot \left(1 + \frac{R_2^2}{R^2}\right) - P_2 \cdot R_2^2 \cdot \left(1 + \frac{R_1^2}{R^2}\right)}{R_2^2 - R_1^2} \quad (\text{eq.E.1})$$

- Variação do raio externo causada pela ação de pressões interna e externa:



$$\Delta R_2 = \frac{R_2}{E} \cdot \left(2 \cdot P_1 \cdot \frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} - P_2 \cdot \left(\frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} - \mu \right) \right) \quad (\text{eq.E.2})$$

- Pressão de interferência:



$$P_o = \frac{\frac{\Delta R}{R_2}}{\frac{1}{E_1} \cdot \left(\frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} - \mu_1 \right) + \frac{1}{E_2} \cdot \left(\frac{R_4^2 + R_3^2}{R_4^2 - R_3^2} + \mu_2 \right)} \quad (\text{eq.E.3})$$

Primeira Aproximação

Aproxima-se a seção circular a uma seção reta que está formada por dois materiais distintos, conforme figura E.1, e se encontra o módulo de elasticidade para o conjunto:

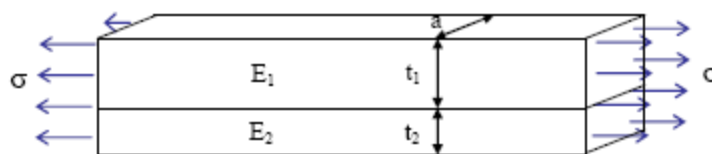


Figura E.1 – Aproximação seção reta (duto /material de preenchimento do defeito)

Do equilíbrio de forças se obtém:

$$F_1 = \sigma \cdot t_1 \cdot a = \varepsilon \cdot E_1 \cdot t_1 \cdot a$$

$$F_2 = \sigma \cdot t_2 \cdot a = \varepsilon \cdot E_2 \cdot t_2 \cdot a$$

$$F = \sigma \cdot (t_1 + t_2) \cdot a = \varepsilon \cdot E \cdot (t_1 + t_2) \cdot a$$

Logo,

$$F = F_1 + F_2$$

$$\varepsilon \cdot E_1 \cdot t_1 \cdot a + \varepsilon \cdot E_2 \cdot t_2 \cdot a = \varepsilon \cdot E \cdot (t_1 + t_2) \cdot a$$

$$E = \frac{E_1 \cdot t_1 + E_2 \cdot t_2}{t_1 + t_2} \quad (\text{eq.E.4})$$

O material 2, representa o adesivo que preenche o defeito e o material 1, representa a soma da espessura das camadas de reparo. Esta aproximação também é utilizada para achar o coeficiente de Poisson do conjunto. Aqui se utiliza $C = 1 - d/t$, onde d é a profundidade do defeito e t é a espessura da parede do duto.

Segunda Aproximação

No primeiro instante, considera-se que os dois cilindros não têm interferência. Para cada incremento da pressão interna ocorre um incremento da interferência (ΔR). Logo, este incremento de interferência gera uma pressão de interferência P_0 , conforme figura E.2:

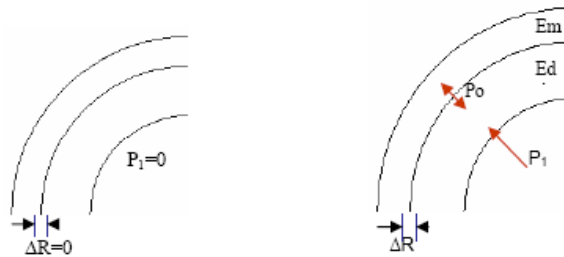


Figura E.2 – Representação da pressão de interferência

Este procedimento é feito para calcular a pressão de interferência (P_o) entre o duto (região do defeito) e o adesivo.

$$P_o = \frac{\frac{R_2}{E_d} \cdot \left(2 \cdot P_1 \cdot \frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \right)}{\frac{1}{E_d} \cdot \left(\frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} - \mu_d \right) + \frac{1}{E_m} \cdot \left(\frac{R_4^2 + R_3^2}{R_4^2 - R_3^2} + \mu_m \right)} \quad (\text{eq.E.5})$$

Logo, esta solução é substituída na equação E.2 em sua forma reduzida para cilindros de parede fina sem prejuízo da exatidão ($\frac{R_1}{t} \approx \frac{R_2}{t} \approx \frac{R}{t} > 20$)

$$\sigma_{circ d} = \frac{R}{t} \cdot (P_1 - P_o) \quad (\text{eq.E.6})$$

Tem-se, deste modo, a tensão circunferencial do duto, na região do defeito:

$$\sigma_{circ d} = \frac{R}{t} \cdot \left(P_1 - \frac{\frac{1}{E_d} \cdot \left(2 \cdot P_1 \cdot \frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \right)}{\frac{1}{E_d} \cdot \left(\frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} - \mu_d \right) + \frac{1}{E_m} \cdot \left(\frac{R_4^2 + R_3^2}{R_4^2 - R_3^2} + \mu_m \right)} \right) \quad (\text{eq.E.7})$$

E, substitui-se alguns termos: $R_1=r$, $R_2=r+t.C$, $R_3=r+t$, $R_4=r+t+h$, $P_1=P$.

Logo, a tensão circunferencial na região com defeito do tubo para um defeito com grande comprimento (por exemplo $L > 5 \cdot \sqrt{D/t}$), será:

$$\sigma_{circ d} = \frac{r.P}{t.C} \cdot \left[1 - \frac{\frac{2.r^2}{(r+t.C)^2 - r^2}}{\left[\frac{(r+t.C)^2 + r^2}{(r+t.C)^2 - r^2} - \mu_d \right] + \frac{E_d}{E_m} \cdot \left[\frac{(r+t+h)^2 + (r+t)^2}{(r+t+h)^2 - (r+t)^2} + \mu_m \right]} \right]$$

(eq.E.8) Onde :

$$P_o = \frac{\frac{2.P.r^2}{(r+t.C)^2 - r^2}}{\left[\frac{(r+t.C)^2 + r^2}{(r+t.C)^2 - r^2} - \mu_d \right] + \frac{E_d}{E_m} \cdot \left[\frac{(r+t+h)^2 + (r+t)^2}{(r+t+h)^2 - (r+t)^2} + \mu_m \right]} \quad (\text{eq.E.9})$$

Para reduzir esta expressão, são utilizadas as seguintes variáveis:

$$P_o = P \cdot \frac{\frac{a_1}{(r+t.C)^2 - r^2}}{\left[\frac{(r+t.C)^2 + r^2}{(r+t.C)^2 - r^2} - \mu_d \right] + \frac{E_d}{E_m} \cdot \left[\frac{(r+t+h)^2 + (r+t)^2}{(r+t+h)^2 - (r+t)^2} + \mu_m \right]}$$

A

$$P_o = P.A \quad (\text{eq.E.10})$$

Então, a tensão circunferencial do duto na região do defeito, pode ter a seguinte forma:

$$\sigma_{\text{circ d}} = \frac{r.P}{t.C} \cdot [1 - A] \quad (\text{eq.E.11})$$

Terceira Aproximação

Para se obter uma equação para a tensão circunferencial média no reparo (camadas metálicas), considera-se que a pressão P_o gera uma variação $\Delta R'$, que por sua vez gera uma outra pressão entre o adesivo e o reparo (P_a).

$$P_a = \frac{\frac{2.P_o.(r+t.C)^2}{(r+t)^2 - (r+t.C)^2}}{\left[\frac{(r+t)^2 + (r+t.C)^2}{(r+t)^2 - (r+t.C)^2} - \mu_c \right] + \frac{E_c}{E_r} \cdot \left[\frac{(r+t+h)^2 + (r+t)^2}{(r+t+h)^2 - (r+t)^2} + \mu_r \right]} \quad (\text{eq.E.12})$$

Substituindo-se o valor de P_o e reduzindo a expressão, tem-se:

$$P_a = P.A \cdot \frac{\frac{2.(r+t.C)^2}{(r+t)^2 - (r+t.C)^2}}{\left[\frac{(r+t)^2 + (r+t.C)^2}{(r+t)^2 - (r+t.C)^2} - \mu_c \right] + \frac{E_c}{E_r} \cdot \left[\frac{(r+t+h)^2 + (r+t)^2}{(r+t+h)^2 - (r+t)^2} + \mu_r \right]} \quad (\text{eq.E.13})$$

$$P_a = P.A.B \quad (\text{eq.E.13})$$

Logo, esta equação é substituída em (4.1), na sua forma reduzida, como foi feito anteriormente, com a diferença que no reparo não atua nenhuma pressão externa. Tem-se, então, a tensão circunferencial do reparo, na região do defeito:

$$\sigma_{\text{circ r}} = \frac{(r+t)}{h} \cdot (P_a)$$

$$\sigma_{circ\ r} = \frac{(r+t).P}{h} \cdot [AB] \quad (\text{eq.E.14})$$

O adesivo que preenche o defeito experimenta a ação de uma pressão interna P_o e uma pressão externa P_a , então a equação E.1 na sua forma reduzida tem a seguinte expressão:

$$\sigma_{circ\ c} = \frac{r+t.C}{t.(1-C)} \cdot (P_o - P_a)$$

Substituindo os valores de P_o e P_a , tem-se:

$$\sigma_{circ\ c} = \frac{r+t.C}{t.(1-C)} \cdot P.A.[1-B] \quad (\text{eq.E.15})$$

Estas equações acima apresentadas determinam, com boa exatidão, o comportamento de um duto com defeito da perda de espessura e reparado, quando comparado aos resultados obtidos por meio de modelagem numérica (elementos finitos).