

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

**ESTUDO DO EFEITO DA ORIENTAÇÃO MOLECULAR NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TUBOS EM POLICLORETO
DE VINILA (PVC)**

FRANCISCO ALVES DE LIMA JÚNIOR

**RECIFE – PERNAMBUCO - BRASIL
FEVEREIRO – 2016**

FRANCISCO ALVES DE LIMA JÚNIOR

**ESTUDO DO EFEITO DA ORIENTAÇÃO MOLECULAR NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TUBOS EM POLICLORETO
DE VINILA (PVC)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Engenharia de Materiais e Fabricação Mecânica.

ORIENTADOR: PROF. DR. TIAGO LEITE ROLIM

RECIFE – PERNAMBUCO - BRASIL

FEVEREIRO – 2016

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

- L732e Lima Júnior, Francisco Alves de.
Estudo do efeito da orientação molecular nas propriedades mecânicas de tubos em Policloreto de Vinila (PVC) / Francisco Alves de Lima Júnior. - 2015.
182f., il., figs., gráfs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Tiago Leite Rolim.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2015.
Inclui Referências.
1. Engenharia Mecânica. 2. Policloreto de Vinila. 3. Orientação molecular . 4. Propriedades mecânicas. I. Rolim, Tiago Leite (Orientador).
II. Título.

621 CDD (22.ed)

UFPE/BCTG-2016/ 128

03 de fevereiro de 2016.

“ESTUDO DO EFEITO DA ORIENTAÇÃO MOLECULAR NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TUBOS EM POLICLORETO DE
VINILA (PVC)”

FRANCISCO ALVES DE LIMA JÚNIOR

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE MATERIAIS E
FABRICAÇÃO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. TIAGO LEITE ROLIM
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRÍQUEZ GUERRERO
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. TIAGO LEITE ROLIM (UFPE)

Prof. Dr. RICARDO ARTUR SANGUINETTI FERREIRA (UFPE)

Prof. Dr. EUCLIDES APOLINÁRIO CABRAL DE PINA (Unit)

Aos meus pais, Francisco Lima e Antônia Lima, pelo esforço e dedicação à minha educação.

A todos os meus familiares e amigos, e a todos os mentores e mestres responsáveis por minha formação acadêmica e profissional, os quais me apresentaram os valores inerentes ao profissional de sucesso e da ética presente nos indivíduos de boa índole.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por todas as bênçãos que tem me proporcionado.

Aos meus pais, Francisco Lima e Antônia Lima, por todo empenho a fim de me prover a melhor educação.

Aos meus irmãos, José Aildo, Cezaneide, Sueli, Suelene e André.

Ao Professor Doutor Tiago Leite Rolim, meu amigo e orientador. Muito obrigado por sua capacidade de suportar todas as minhas dúvidas, conduzindo de maneira segura em todo o trajeto desta pesquisa. Além de tudo, por sua elegância no trato pessoal durante a pesquisa.

Não poderia deixar de agradecer aos amigos que, quando recorridos, esforçaram-se para cooperar e apoiar neste desafio: Professor Mestre Jorge Neves Moll, Professor Mestre Ernes Ferreira Costa Neto, Professor Mestre José Roberto Danieletto, Professor Mestre Francisco Diego Araruna, Professor Mestre Robson Dias Ramalho, Professor Especialista Cláudio Henrique Milfont, e aos técnicos do Departamento de Engenharia de Qualidade e Inovação de Produtos: Marcel André da Silva, José Roberto Cândido do Carmo, Moisés Sousa Pereira e José Leandro Cardoso, da Empresa Mexichem Indústria de Transformação de Plásticos do Brasil S.A.

A Empresa Mexichem Indústria de Transformação de Plásticos do Brasil S.A. pelo apoio técnico, condução e orientação dos testes em laboratório.

A todos minha gratidão e respeito.

RESUMO

A pesquisa que deu origem a esta dissertação foi realizada a partir de dados de propriedades mecânicas obtidos de testes e ensaios de inspeção, performance e controle de qualidade, executados em tubos fabricados em material polimérico, com e sem orientação molecular. Foram eles: Resistência ao Impacto, Resistência à Pressão Hidrostática Interna, Grau de Gelificação e Resistência ao Cloreto de Metileno, Resistência à Compressão Diametral, Estabilidade Dimensional, Classe de Rigidez e Resistência ao Achatamento, Resistência o Prolongamento da Fissura e Grau de Orientação Molecular. Para obtenção dos dados, os materiais foram testados em condições reais e extremas de operação, em sistemas, equipamentos, instrumentos, “softwares” e acessórios especificados, montados e calibrados em laboratório e instalações fabris, conforme normativos técnicos. Para registros dos dados foram utilizados sistemas informatizados acessórios aos equipamentos, assim como planilhas eletrônicas e “softwares” de controle estatístico e descritivo e para parametrização de ensaios mecânicos. Os dados e resultados foram analisados segundo parâmetros e critérios de estabilidade dimensional, tenacidade e rigidez, resistência à pressão hidrostática interna, ao impacto, ao cloreto de metileno, à compressão diametral e ao prolongamento de fissura, associados ao seu grau de orientação molecular, baseados em bibliografias e normas técnicas referentes às análises, ensaios e materiais empregados. Estes critérios abrangem o dimensionamento, cálculo e comparação de parâmetros, quando do material aplicado ao projeto de tubos. Foram avaliados os efeitos resultantes da orientação molecular nas propriedades mecânicas finais dos produtos acabados. Foi observado que o processo de orientação molecular proporcionou ao material maior tenacidade, maior resistência à transmissão da fissura, bem como maiores resistências a fadiga, impacto, tração, compressão e deformação, maior módulo de elasticidade, e conseqüente diminuição de coeficientes de segurança aplicados ao projeto.

Palavras-chave: Policloreto de Vinila, Orientação Molecular, Propriedades Mecânicas.

ABSTRACT

The research that led to this work was made from data obtained mechanical properties testing and inspection testing, performance and quality control, performed in tubes made of polymer material, with or without molecular orientation. They were: Impact Resistance, Resistance Pressure Internal Hydro, Grade Gelling and resistance Methylene Chloride, Resistance Diametral compression, dimensional stability, Class of stiffness and resistance to flattening, resistance to extension of the fissure and Molecular Orientation degree. To obtain the data, the materials have been tested in real and extreme operating conditions, systems, equipment, instruments, “software” and accessories specified, assembled and calibrated in laboratory and manufacturing facilities, as technical regulations. For data records were used computer accessories systems for equipment, as well as spreadsheets and statistical and descriptive control “software” for parameter setting and mechanical tests. The data and results were analyzed according to parameters and dimensional stability criteria, toughness and rigidity, resistance to internal hydrostatic pressure, impact, methylene chloride, diametral compression and extension cleft associated to the degree of molecular orientation, based in technical bibliographies and rules regarding analyzes, testing and materials used. These criteria cover the design, calculation and parameters comparison, when the material applied to the pipe design. The effects resulting from the molecular orientation in the final mechanical properties of finished products. It was observed that the molecular orientation process provided the material greater toughness, greater resistance to the transmission of the crack, as well as higher resistance to fatigue, impact, tensile, compression and creep, higher modulus, and thus reduce safety coefficients applied to project.

Keywords: Polyvinyl Chloride, Molecular Orientation, Mechanical Properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

		Página
Figura 1:	Segmentação do mercado brasileiro de plásticos em 2014.....	35
Figura 2:	Principais aplicações do PVC no Brasil por segmento em 2014..	36
Figura 3:	Demanda Global de PVC em 2014.....	37
Figura 4:	Polimerização do Cloreto de Vinila.....	38
Figura 5:	Estrutura do PVC.....	39
Figura 6:	Partícula de PVC obtido pelo processo de polimerização em suspensão visualizada no microscópio eletrônico de varredura (MEV). Aumento de 645x.....	41
Figura 7:	Micrografia de uma partícula de PVC obtida pelo processo de polimerização em suspensão, cortada de modo a exibir sua estrutura interna e observada através do microscópio eletrônico de varredura.....	41
Figura 8:	Sistema de Alimentação, Desumidificação e Secagem de Matéria-Prima em uma Extrusora: (a) sistema de alimentação a vácuo; (b) funil de alimentação e sistema de controle de matéria-prima.....	44
Figura 9:	Zonas de Alimentação, Plastificação, Cisalhamento, Fundição e Transporte em uma Extrusora: (a) vista geral do equipamento; (b) aquecedor elétrico.....	45
Figura 10:	Zonas de Equalização de fluxo de Massa, Formatação e Calibração em uma Extrusora: (a) cabeçote; (b) calibrador de diâmetro e tanque de calibração.....	46
Figura 11:	Zonas de Resfriamento, Impressão, Arraste, Corte e Formatação da Bolsa uma Extrusora: (a) tanque de resfriamento; (b) impressora a quente; (c) puxador; (d) serra de corte; (e) bolsadeira; (f) paletizador.....	47
Figura 12:	Controles dos parâmetros do processo de extrusão: (a) controle de velocidade; (b) controle de espessura de parede; (c) controle de excentricidade.....	48
Figura 13:	Tipos de extrusoras de rosca dupla: (a) paralela; (b) cônica.....	50
Figura 14:	Processo de extrusão de tubos de PVC.....	53

Figura 15:	Representação esquemática de uma matriz típica para extrusão de tubos de PVC.....	54
Figura 16:	Visão esquemática dos processos de orientação monoaxial e biaxial.....	56
Figura 17:	Unidade de Controle Térmico para Pré-aquecimento de Pré-formas para Orientação Molecular.....	58
Figura 18:	Processo de Orientação Molecular Biaxial: (a) Visão Esquemática da Expansão da pré-forma; (b) Visão Real da Expansão da pré-forma; (c) Mandril de Orientação Molecular (d) Puxador.....	58
Figura 19:	Unidade de Orientação Molecular Biaxial.....	59
Figura 20:	Composição do Mandril de Orientação Molecular.....	59
Figura 21:	Linha de extrusão contínua do PVC-O.....	60
Figura 22:	Fotografia de superfície de “Fratura em Camadas” de tubo PVC-O ensaiado em teste hidrostático.....	60
Figura 23:	Fotografia das estruturas da molécula antes e após a orientação molecular. (a) Estrutura sem orientação molecular; (b) Estrutura com orientação molecular.....	61
Figura 24:	Representação de tensão hidrostática induzida na parede de um tubo.....	67
Figura 25:	Curva de regressão para determinação de resistência hidrostática a longo prazo de tubo PVC-O DN 100 fabricado pela Amanco Brasil.....	71
Figura 26:	Desenho esquemático de colapso sofrido por um tubo.....	76
Figura 27:	Tubulação sujeita ao colapso, sob vácuo interno ou pressão externa.....	77
Figura 28:	Deformação diametral de um tubo ovalizado.....	78
Figura 29:	Tubos selecionados por amostragem para confecção de corpos de prova: (a) Tubos Ductilfort Jeri DEFOFO sem orientação molecular; (b) Tubos Biax Adução Jeri com orientação molecular.....	85
Figura 30:	Identificação e rastreabilização dos tubos: (a) Tubos Ductilfort Jeri DEFOFO sem orientação molecular; (b) Tubos Biax	

	Adução Jeri com orientação molecular.....	86
Figura 31:	Confecção e identificação dos corpos de prova: (a) Corte das amostras e confecção dos corpos de prova; (b) Separação e identificação dos corpos de prova.....	87
Figura 32:	Equipamento para teste de impacto: (a) Desenho esquemático; (b) Equipamento em Laboratório.....	91
Figura 33:	Separação e identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Percursor Metálico.....	91
Figura 34:	Conferência de dimensões dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Percursor Metálico.....	92
Figura 35:	Preparação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Percursor Metálico em banho termoestabilizado: (a) Tanque Termoestabilizado; (b) Imersão dos corpos de prova; (c) Controles de tempo e temperatura para estabilização dos corpos de prova.....	93
Figura 36:	Percussores adotados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Percursor Metálico: (a) Percussor de massa 6,3 Kg; (b) Percussor de massa 12,5 Kg.....	95
Figura 37:	Desenho esquemático dos percussores adotados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Percursor Metálico..	95
Figura 38:	Medição das massas dos percussores adotados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Percursor Metálico: (a) Percussor de massa 6,3 Kg; (b) Percussor de massa 12,5 Kg.....	96
Figura 39:	Ajuste do equipamento para teste de impacto: (a) Posicionamento das alturas dos apoios; (b) Controle da altura de queda.....	96
Figura 40:	Posicionamento dos corpos de prova no equipamento para teste de impacto: (a) Tubo com orientação molecular; (b) Tubo sem orientação molecular.....	97
Figura 41:	Aparelhagem para teste de verificação da resistência à pressão	

	hidrostática interna: (a) Tanque de condicionamento com banho termoestabilizado; (b) Equipamento de pressurização com regulador de pressão.....	98
Figura 42:	Separação e identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de verificação da resistência à pressão hidrostática interna.....	99
Figura 43:	Montagens dos conjuntos corpos de prova – peças de conexão – tampões, utilizados no Ensaio de verificação da resistência à pressão hidrostática interna. (a) Desenho esquemático; (b) Montagens em Laboratório.....	100
Figura 44:	Preparação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de verificação da resistência à pressão hidrostática interna (a) Conexão dos corpos de prova ao sistema de pressurização; (b) Imersão e termoestabilização dos corpos de prova.....	101
Figura 45:	Execução do Ensaio de verificação da resistência à pressão hidrostática interna: (a) Parametrização das rampas de pressão; (b) Controle de pressão e tempo de ensaio.....	102
Figura 46:	Aparelhagem para teste de Resistência ao Cloreto de Metileno (Grau de Gelificação): (a) Tanque de condicionamento para banho termoestabilizado em cloreto de metileno; (b) Controle digital de temperatura e tempo, (c) Estufa microprocessada com controle termostático; (d) Relógio temporizador.....	104
Figura 47:	Separação e acondicionamento em estufa dos corpos de prova com orientação molecular, utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Cloreto de Metileno (Grau de Gelificação), com controle de temperatura.....	105
Figura 48:	Confecção de chanfros nos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Cloreto de Metileno (Grau de Gelificação).....	106
Figura 49:	Imersão dos corpos de prova em cloreto de metileno. (a) Desenho esquemático; (b) Corpos de prova imersos em laboratório.....	107
Figura 50:	Aparelhagem para teste de verificação da resistência à	

	compressão diametral: (a) Máquina universal de ensaios Capacidade 100 kN; (b) Visão geral da tela de trabalho gerada a partir do Software para parametrização de ensaios mecânicos Tesc; (c) Paquímetro Digital Capacidade 200mm Resolução 0.01 mm.....	109
Figura 51:	Conferência de dimensões dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência à Compressão Diametral	110
Figura 52:	Inserção de parâmetros do Ensaio de Verificação da Resistência à Compressão Diametral no Software Emic Tesc Full 3.04.....	111
Figura 53:	Realização do Ensaio de Verificação da Resistência à Compressão Diametral. (a) Tubos com Orientação Molecular; (b) Tubos sem Orientação Molecular.....	112
Figura 54:	Aparelhagem para teste de verificação da estabilidade dimensional: (a) Gabarito para marcação de corpos de prova e Paquímetro Digital Capacidade 200mm Resolução 0.01 mm; (b) Relógio temporizador.....	114
Figura 55:	Conferência de dimensões e traçagem de marcações circulares nos corpos de prova traçadas com gabarito, na realização do Ensaio de Verificação da Estabilidade Dimensional: (a) Tubos sem orientação molecular; (b) Tubos com orientação molecular.	115
Figura 56:	Posicionamento dos corpos de provas utilizados no Ensaio de Verificação da Estabilidade Dimensional em estufa microprocessada.....	117
Figura 57:	Aparelhagem para teste de verificação da resistência à compressão diametral: (a) Máquina universal de ensaios Capacidade 100 kN; (b) Visão geral da tela de trabalho gerada a partir do Software para parametrização de ensaios mecânicos Tesc; (c) Paquímetro Digital Capacidade 200mm Resolução 0.01 mm.....	120
Figura 58:	Inserção de parâmetros do Ensaio de determinação da classe de rigidez e resistência ao achatamento no Software Emic Tesc Full 3.04.....	121
Figura 59:	Realização do Ensaio de determinação da classe de rigidez e	

	resistência ao achatamento: (a) Tubos com Orientação Molecular; (b) Tubos sem Orientação Molecular.....	123
Figura 60:	Aparelhagem para Ensaio de Avaliação da Resistência ao Prolongamento da Fissura (a) Máquina pneumática para confecção de entalhe; (b) Instrumentação utilizada; (c) Software para Equipamento de teste C; (d) Equipamento de teste C.....	125
Figura 61:	Preparação dos corpos de prova para o Ensaio de da Resistência ao Prolongamento da Fissura: (a) Corte das amostras em quatro segmentos; (b) Marcação dos ângulos.....	126
Figura 62:	Preparação dos corpos de prova para o Ensaio de da Resistência ao Prolongamento da Fissura: (a) Desenho esquemático da confecção do entalhe e corte; (b) Confecção de entalhes; (c) Entalhes confeccionados a 0° e 180°; (d) Entalhes confeccionados a 90° e 270°.....	127
Figura 63:	Montagem dos corpos de prova para o Ensaio de da Resistência ao Prolongamento da Fissura: (a) Posicionamento de gabarito para marcação de posicionamento das presilhas metálicas; (b) Posicionamento e fixação das presilhas metálicas; (c) Desenho esquemático da montagem dos conjuntos anéis-presilhas; (d) Montagem dos conjuntos anéis-presilhas.....	128
Figura 64:	Realização do Ensaio de da Resistência ao Prolongamento da Fissura: (a) Posicionamento e montagem dos conjuntos no Equipamento; (b) Tela de acompanhamento de parâmetros; (c) Aplicação de carga dinâmica de dobramento em corpo de prova; (d) Resposta de corpos de prova em relação à carga dinâmica de dobramento aplicada.....	130
Figura 65:	Aparelhagem para teste de verificação Grau de Orientação Molecular: (a) Gabarito para marcação de corpos de prova e Paquímetro Digital Capacidade 300mm Resolução 0.01 mm; (b) Estufa microprocessada.....	132
Figura 66:	Medições de dimensões iniciais e finais e traçagem de marcações circulares nos corpos de prova utilizados no Ensaio de Grau de Orientação Molecular, traçadas com gabarito antes	

	da execução do Ensaio.....	133
Figura 67:	Inserção dos Corpos de prova utilizados no Ensaio de Grau de Orientação Molecular em estufa microprocessada.....	134
Figura 68:	Conferência de dimensões e traçagem de marcações circulares nos corpos de prova utilizados no Ensaio de Grau de Orientação Molecular, traçadas com gabarito após a execução do Ensaio.....	135
Figura 69:	Equipamento para teste de impacto com Pêndulo de Charpy: (a) Desenho esquemático; (b) Equipamento em Laboratório.....	137
Figura 70:	Separação e identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Pêndulo Charpy.....	138
Figura 71:	Conferência de dimensões dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Pêndulo Charpy.....	139
Figura 72:	Visão esquemática da calibração da abertura dos suportes dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Pêndulo Charpy.....	139
Figura 73:	Execução do Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Pêndulo Charpy :(a) Posicionamento dos corpos de prova; (b) Liberação do pêndulo de impacto para desferimento do golpe.....	140
Figura 74:	Avaliações das profundidades das depressões e reduções percentuais médias de espessura geradas a partir das quedas dos percussores metálicos: (a) Tubos com orientação molecular; (b) Tubos sem orientação molecular.....	142
Figura 75:	Profundidades das depressões geradas a partir das quedas dos percussores metálicos.....	143
Figura 76:	Reduções percentuais médias de espessura geradas a partir das quedas dos percussores metálicos.....	143
Figura 77:	Gráficos de resultados do Ensaio de verificação da resistência à pressão hidrostática interna de curta duração para Corpos de Prova extraídos a partir de tubos sem orientação molecular, gerados pelo Software IPT Datalogging V4.0.....	146

Figura 78:	Gráficos de resultados do Ensaio de verificação da resistência à pressão hidrostática interna de curta duração para Corpos de Prova extraídos a partir de tubos com orientação molecular, gerados pelo Software IPT Datalogging V4.0.....	148
Figura 79:	Avaliações dos corpos de prova após as realizações dos ensaios quanto ao estado estrutural e mecânica da fratura: (a) Tubos sem orientação molecular; (b) Tubos com orientação molecular.....	149
Figura 80:	Verificação de pontos de ataque, após imersão dos corpos de prova em cloreto de metileno. (a) Tubos com Orientação Molecular; (b) Tubos sem Orientação Molecular.....	150
Figura 81:	Reconferência de dimensões dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência à Compressão Diametral...	151
Figura 82:	Gráficos de resultados do Ensaio de verificação da à compressão diametral para Corpos de Prova extraídos a partir de tubos com e sem orientação molecular, gerados pelo Software Emic Tesc Full 3.04.....	153
Figura 83:	Achatamentos residuais causados por aplicações de níveis de deflexões pré-definidos.....	153
Figura 84:	Deflexões residuais causadas por aplicações de cargas de deflexões pré-definidas.....	154
Figura 85:	Quantificação da variação longitudinal em relação à configuração original.....	155
Figura 86:	Variação longitudinal percentual em relação à configuração original.....	156
Figura 87:	Gráficos de resultados do Ensaio de determinação da classe de rigidez e resistência ao achatamento para Corpos de Prova extraídos a partir de tubos com e sem orientação molecular, gerados pelo Software Emic Tesc Full 3.04.....	157
Figura 88:	Quantificação das Constantes Elásticas.....	158
Figura 89:	Quantificação das Classes de Rigidez.....	158
Figura 90:	Tempo de execução do Ensaio de Avaliação da Resistência ao Prolongamento da Fissura.....	160
Figura 91:	Análises dos aspectos das fraturas após a realização do Ensaio	

	de avaliação da resistência ao prolongamento da fissura: (a) Tubos sem orientação molecular; (b) Tubos com orientação molecular.....	161
Figura 92:	Variações Dimensionais após Ensaio Verificação do Grau de Orientação.....	161
Figura 93:	Quantificação dos Graus de Orientação.....	163
Figura 94:	Energia Potencial de Impacto Absorvida quando do lançamento do Pêndulo de Charpy.....	164
Figura 95:	Aspectos dos corpos de prova após a execução do ensaio de verificação da resistência ao impacto com pêndulo de Charpy....	166

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1: Coeficientes de regressão linear para os Tubos DN 100 com e sem orientação molecular, fabricados pela Amanco Brasil.....	70
Tabela 2: Coeficientes de correção da pressão de colapso para tubos ovalizados.....	78
Tabela 3: Materiais utilizados no desenvolvimento da Pesquisa.....	84
Tabela 4: Dados das Amostras coletadas das linhas de produção para confecção de Corpos de Prova.....	84
Tabela 5: Dados das Amostras coletadas das linhas de produção para confecção de Corpos de Prova.....	88
Tabela 6: Aparelhagem necessária à execução do Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Percursor Metálico.....	90
Tabela 7: Identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Percursor Metálico.	92
Tabela 8: Parâmetros normativos para avaliação de resistência ao impacto por percussor.....	94
Tabela 9: Parâmetros críticos para avaliação de resistência ao impacto por percussor.....	94
Tabela 10: Aparelhagem necessária à execução do Ensaio de Verificação da Resistência à Pressão Hidrostática Interna.....	98
Tabela 11: Identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de verificação da resistência à pressão hidrostática interna.....	99
Tabela 12: Parametrização de rampas de pressão e tempo no equipamento de pressurização, por meio do Software IPT Datalogging V4.0..	101
Tabela 13: Aparelhagem necessária à execução do Ensaio de Verificação da Resistência ao Cloreto de Metileno (Grau de Gelificação).....	103
Tabela 14: Identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Cloreto de Metileno (Grau de Gelificação).....	106
Tabela 15: Aparelhagem necessária à execução do Ensaio de Verificação da Resistência à Compressão Diametral.....	108
Tabela 16: Identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de	

	verificação da resistência compressão diametral.....	110
Tabela 17:	Aparelhagem necessária à execução do Ensaio de Verificação da Estabilidade Dimensional.....	114
Tabela 18:	Identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Estabilidade Dimensional.....	116
Tabela 19:	Aparelhagem necessária à execução do Ensaio de Determinação da Classe de Rigidez e Resistência ao Achatamento.....	119
Tabela 20:	Identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de determinação da classe de rigidez e resistência ao achatamento..	121
Tabela 21:	Aparelhagem necessária à execução do Ensaio de Avaliação da Resistência ao Prolongamento da Fissura (Resistência do Anel C).....	124
Tabela 22:	Identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de da Resistência ao Prolongamento da Fissura.....	128
Tabela 23:	Inserção de parâmetros do Ensaio de da Resistência ao Prolongamento da Fissura no Software Engel.....	129
Tabela 24:	Aparelhagem necessária à execução do Ensaio de Verificação do Grau de Orientação Molecular.....	131
Tabela 25:	Identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação do Grau de Orientação Molecular.....	132
Tabela 26:	Aparelhagem necessária à execução do Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Pêndulo de Charpy.....	136
Tabela 27:	Identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Pêndulo Charpy.....	138
Tabela 28:	Energias potenciais geradas no Ensaio Verificação da Resistência ao Impacto com Percursor Metálico.....	141
Tabela 29:	Profundidades das depressões e reduções percentuais médias de espessura geradas a partir das quedas dos percussores metálicos	142
Tabela 30:	Resultados do Ensaio de verificação da resistência à pressão hidrostática interna de curta duração para Corpos de Prova extraídos a partir de Tubos sem orientação molecular.....	145
Tabela 31:	Resultados do Ensaio de verificação da resistência à pressão	

	hidrostática interna de curta duração para Corpos de Prova extraídos a partir de Tubos sem orientação molecular.....	147
Tabela 32:	Resultados do Ensaio de verificação da resistência à compressão diametral para Corpos de Prova extraídos a partir de Tubos com e sem orientação molecular.....	152
Tabela 33:	Resultados do Ensaio de verificação da estabilidade dimensional para Corpos de Prova extraídos a partir de Tubos sem orientação molecular.....	155
Tabela 34:	Resultados do Ensaio de determinação da classe de rigidez e resistência ao achatamento para Corpos de Prova extraídos a partir de Tubos com e sem orientação molecular.....	157
Tabela 35:	Resultados do Ensaio de Avaliação da Resistência ao Prolongamento da Fissura.....	159
Tabela 36:	Resultados do Ensaio de Verificação do Grau de Orientação.....	162
Tabela 37:	Resultados do Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Pêndulo de Charpy.....	164

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

σ	Tensão hidrostática circunferencial induzida
P_h	Pressão hidrostática interna atuante.
d_{en}	Diâmetro externo médio do Tubo.
e_n	Espessura média de parede do Tubo.
σ_{adm}	Tensão admissível do material.
σ_{LPL}	Tensão limite de confiança inferior para a resistência hidrostática prevista.
MRS	Resistência mínima requerida.
σ_{LTHS}	Tensão hidrostática de longo prazo.
σ_S	Tensão circunferencial admissível de projeto.
P_n	Pressão nominal do sistema.
C	Coefficiente total de projeto ou serviço.
m	Massa do Percussor Metálico
P_{cri}	Pressão crítica de colapso, sem apoio externo.
E	Módulo de elasticidade.
ρ	Coefficiente de Poisson do material.
P_{crio}	Pressão crítica de colapso para Tubulação ovalizada, sem apoio externo.
F	Carga aplicada ao material.
I	Momento de inércia da seção do tubo, em relação à linha neutra.
TIR	Taxa real de impacto.
PVC	Cloreto de polivinila.
PVC-U	Cloreto de polivinila não plastificado sem orientação molecular.
PVC-O	Cloreto de polivinila não plastificado com orientação molecular.
CMAI	Chemical Market Associates, Inc.
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento.
ECVM	European Council of Vinyl Manufactures.
MNV	Monômero cloreto de vinila.
MEV	Microscópio eletrônico de varredura.
PP	Polipropileno.
PE	Polietileno.
PS	Poliestireno.
PMMA	Polimetilmetacrilato

C_δ	Coeficiente de correção da pressão crítica de colapso.
δ	Compressão diametral do material.
J	Variação longitudinal.
X_i	Média aritmética da distância entre as marcas circulares ou pontuais nos Tubos antes do ensaio de verificação de estabilidade dimensional.
X_f	Média aritmética da distância entre as marcas circulares ou pontuais Tubos após do ensaio de verificação de estabilidade dimensional.
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora.
ISO	International Organization for Standardization.
L_i	Média aritmética das distâncias entre as marcas circulares nos Tubos antes do ensaio de verificação do grau de orientação molecular.
L_f	Média aritmética das distâncias entre as marcas circulares nos Tubos depois do ensaio de verificação do grau de orientação molecular.
D_i	Média aritmética dos diâmetros nas marcas circulares nos Tubos antes do ensaio de verificação do grau de orientação molecular.
D_f	Média aritmética dos diâmetros nas marcas circulares nos Tubos depois do ensaio de verificação do grau de orientação molecular.
e_i	Média aritmética das espessuras nas marcas circulares nos Tubos antes do ensaio de verificação do grau de orientação molecular.
e_f	Média aritmética das espessuras nas marcas circulares nos Tubos depois do ensaio de verificação do grau de orientação molecular.
Kg	Quilograma
MCV	Cloreto de vinila
PET	Politereftalato de etileno
Tg	Temperatura de transição vítrea
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
E_I	Energia potencial de impacto
g	Aceleração da gravidade
h	Altura de queda do percussor
T	Tempo de falha do material.
T	Temperatura de ensaio.
I/L	Relação do momento de inércia da seção transversal da parede do tubo por unidade de comprimento.

D_m	Diâmetro médio do corpo de prova.
CR	Classe de rigidez.
ΔV	Deflexão vertical.
PHI	Pressão hidrostática interna.
h_f	Distância final entre os pratos da máquina universal de ensaios após deflexão do Tubo.
h_i	Distância inicial entre os pratos da máquina universal de ensaios antes da deflexão do Tubo.
λ_a	Grau de orientação molecular axial.
Λ_c	Grau de orientação molecular circunferencial.
DEFOFO	Diâmetro externo do tubo intercambiável com o diâmetro interno de um tubo fabricado em Ferro Fundido

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	29
1.1. Justificativas e necessidades para a realização da pesquisa.....	30
1.2. Conteúdo da dissertação.....	31
2. OBJETIVOS.....	33
2.1. Objetivo Geral.....	33
2.2. Objetivos Específicos.....	33
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	34
3.1. Materiais Plásticos – Generalidades.....	34
3.2. Resina de PVC.....	35
3.3. Estrutura do PVC – Obtenção e Morfologia de Partícula.....	38
3.4. Características e Processamento do PVC.....	42
3.4.1. Moldagem por extrusão.....	42
3.4.2. Extrusoras de Rosca Dupla.....	50
3.4.3. Comportamento reológico do composto de PVC rígido no processo de Extrusão.....	51
3.4.4. Principais processos de fabricação de produtos de PVC baseados em extrusão.....	52
3.4.5. Extrusão de tubos rígidos de PVC.....	52
3.5. Orientação Molecular.....	54
3.5.1. Tipos de orientação molecular.....	56
3.5.2. Moldagem por Extrusão com Orientação Molecular Biaxial.....	56
4. DIMENSIONAMENTO, CÁLCULO E PARÂMETROS DE PROJETO DE TUBOS EM PVC.....	62
4.1. Os Tubos de PVC no Brasil.....	62
4.2. Resistência e Performance dos Materiais Plásticos.....	63
4.3. Resistência ao Impacto.....	64
4.4. Resistência à Pressão Hidrostática Interna.....	65
4.4.1. Tensões nos Tubos.....	66
4.4.1.1. Tensão Circunferencial Induzida.....	66
4.4.1.2. Tensão Limite de Confiança Inferior.....	67
4.4.1.3. Tensão de Projeto.....	67

4.4.1.4. Tensão Admissível do Material.....	68
4.4.1.5. Curvas de Regressão, Resistência Mínima Requerida e Tensão Hidrostática de Longo Prazo.....	68
4.4.2. Coeficiente de Segurança de Projeto ou Serviço.....	71
4.4.3. Classificação e Dimensionamento de Tubos.....	72
4.5. Grau de Gelificação e Resistência ao Cloreto de Metileno.....	73
4.6. Resistência à Compressão Diametral.....	76
4.6.1. Colapso devido ao Vácuo Interno ou Pressão Externa.....	76
4.7. Estabilidade Dimensional.....	79
4.8. Resistência ao Achatamento e Classe de Rigidez.....	79
4.9. Resistência ao Prolongamento de Fissura.....	80
4.10. Grau de Orientação Molecular.....	82
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	84
5.1. Materiais.....	84
5.2. Métodos.....	89
5.2.1. Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Percursor Metálico.....	89
5.2.1.1. Normas de referência e documentos complementares....	89
5.2.1.2. Aparelhagem.....	89
5.2.1.3. Preparação dos corpos de prova.....	91
5.2.1.4. Procedimento.....	94
5.2.2. Ensaio de Verificação da Resistência à Pressão Hidrostática Interna.....	97
5.2.2.1. Normas de referência e documentos complementares....	97
5.2.2.2. Aparelhagem.....	97
5.2.2.3. Preparação dos corpos de prova.....	99
5.2.2.4. Procedimento.....	100
5.2.3. Ensaio de Verificação da Resistência ao Cloreto de Metileno (Grau de Gelificação).....	102
5.2.3.1. Normas de referência e documentos complementares....	102
5.2.3.2. Aparelhagem e Reagente.....	103
5.2.3.3. Preparação dos corpos de prova.....	105
5.2.3.4. Procedimento.....	106

5.2.4. Ensaio de Verificação da Resistência à Compressão Diametral..	108
5.2.4.1. Normas de referência e documentos complementares....	108
5.2.4.2. Aparelhagem.....	108
5.2.4.3. Preparação dos corpos de prova.....	109
5.2.4.4. Procedimento.....	111
5.2.5. Ensaio de Verificação da Estabilidade Dimensional.....	113
5.2.5.1. Normas de referência e documentos complementares....	113
5.2.5.2. Aparelhagem.....	114
5.2.5.3. Preparação dos corpos de prova.....	115
5.2.5.4. Procedimento.....	117
5.2.6. Ensaio de Determinação da Classe de Rigidez e Resistência ao Achatamento.....	118
5.2.6.1. Normas de referência e documentos complementares....	118
5.2.6.2. Aparelhagem.....	119
5.2.6.3. Preparação dos corpos de prova.....	120
5.2.6.4. Procedimento.....	121
5.2.7. Ensaio de Avaliação da Resistência ao Prolongamento da Fissura (Resistência do Anel C).....	123
5.2.7.1. Normas de referência e documentos complementares....	124
5.2.7.2. Aparelhagem.....	124
5.2.7.3. Preparação dos corpos de prova.....	125
5.2.7.4. Procedimento.....	128
5.2.8. Ensaio de Verificação do Grau de Orientação Molecular.....	130
5.2.8.1. Normas de referência e documentos complementares....	131
5.2.8.2. Aparelhagem.....	131
5.2.8.3. Preparação dos corpos de prova.....	132
5.2.8.4. Procedimento.....	134
5.2.9. Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Pêndulo de Charpy.....	135
5.2.9.1. Normas de referência e documentos complementares....	135
5.2.9.2. Aparelhagem.....	136
5.2.9.3. Preparação dos corpos de prova.....	137
5.2.9.4. Procedimento.....	139

6. RESULTADOS	141
6.1. Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Percursor Metálico.....	141
6.2. Ensaio de Verificação da Resistência à Pressão Hidrostática Interna...	144
6.2.1. Tubos sem Orientação Molecular.....	144
6.2.2. Tubos com Orientação Molecular.....	147
6.3. Ensaio de Verificação da Resistência ao Cloreto de Metileno (Grau de Gelificação).....	151
6.4. Ensaio de Verificação da Resistência à Compressão Diametral.....	151
6.5. Ensaio de Verificação da Estabilidade Dimensional.....	155
6.6. Ensaio de Determinação da Classe de Rigidez e Resistência ao Achatamento.....	157
6.7. Ensaio de Avaliação da Resistência ao Prolongamento da Fissura (Resistência do Anel C).....	160
6.8. Ensaio de Verificação do Grau de Orientação.....	162
6.9. Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Pêndulo de Charpy.....	164
7. CONCLUSÕES.....	167
7.1. Resistência ao Impacto com Percussor Metálico.....	167
7.2. Resistência à Pressão Hidrostática Interna.....	167
7.3. Resistência ao Cloreto de Metileno (Grau de Gelificação).....	167
7.4. Resistência à Compressão Diametral.....	168
7.5. Estabilidade Dimensional.....	168
7.6. Classe de Rigidez e Resistência ao Achatamento.....	169
7.7. Resistência ao Prolongamento da Fissura	169
7.8. Grau de Orientação Molecular.....	169
7.9. Resistência ao Impacto com Pêndulo de Charpy.....	170
7.10. Características Estruturais e Operacionais Finais.....	170
7.11. Sobre a pesquisa.....	171
7.12. Transferência de Tecnologia.....	171
7.13. Propostas de temas para a continuidade da pesquisa.....	172
8. REFERÊNCIAS.....	174
9. APÊNDICES.....	180

9.1. APÊNDICE A – Análise de regressão em uma tubulação de PVC-O DN100 Amanco Brasil (Regression Analysis on a DN100 PVC-O Pipe From Amanco Brasil).....	180
9.2. APÊNDICE B – Relatórios de verificação da resistência a pressão hidrostática interna de curta duração Emitidos pelo Software IPT Datalogging V4.0, do Equipamento de pressurização com regulador de pressão para teste de pressão hidrostática interna.....	193
9.3. APÊNDICE C – Relatórios de verificação da resistência a compressão diametral Emitidos pelo software para parametrização de ensaios mecânicos Tesc Versão Full 3.04, da Máquina Universal de Ensaio EMIC DL 10000.....	206
9.4. APÊNDICE D – Relatórios de verificação de determinação da classe de rigidez e resistência ao achatamento Emitidos pelo software para parametrização de ensaios mecânicos Tesc Versão Full 3.04, da Máquina Universal de Ensaio EMIC DL 10000.....	208

1. INTRODUÇÃO

Há dezenas de milhares de anos a humanidade começou a transformar o mundo ao seu redor quando conseguiu usar a seu favor os materiais encontrados na natureza. A criação de novos materiais que possam atender as nossas necessidades, tanto do ponto de vista do desenvolvimento de novas tecnologias, como também para substituir outros na tentativa de diminuir custos e ampliar e aperfeiçoar as suas aplicações, é uma busca constante.

Entre os materiais mais utilizados no mundo estão os plásticos, devido à sua grande versatilidade. Por esta razão, o emprego destes vem alcançando um papel cada vez mais importante e, por que não dizer, fundamental em nosso cotidiano.

O mercado de tubos e conexões de PVC no Brasil representa anualmente cerca de 500.000 toneladas de resina vinílica, sendo que esse segmento é proporcional a quase metade do consumo aparente de resina no Brasil (INSTITUTO DO PVC, 2015). A principal aplicação desse produto é o transporte de água potável e esgoto em instalações prediais e sistemas de infraestrutura, além do uso industrial (MARTINS; FREIRE; HEMADIPOUR, 2009).

O PVC aparece como excelente material para essas aplicações, sendo algumas vantagens a manutenção da qualidade da água transportada, resistência química, resistência à oxidação, baixo peso devido à baixa densidade (frente aos materiais metálicos), fácil reciclagem, baixo custo e comprovada longa vida-útil (BREEN; SLAATS; VREEBURG, 2004). Destacam-se o alto módulo elástico, alta dureza e excelente estabilidade dimensional frente aos outros polímeros *commodities*. Considera-se ainda o fator ecológico, já que apenas 43% da massa do PVC vêm do petróleo sendo os outros 57% originados a partir do sal marinho, um recurso renovável e não poluente. Projetos em curso devem substituir parte do petróleo, por cana-de-açúcar, como recurso base alternativo para produção do monômero cloreto de etileno, transformando o PVC num material ecologicamente sustentável (MARTINZ; QUADROS, 2008).

Dentro de uma abordagem mais específica, anos de pesquisas sobre o processamento do Policloreto de Vinila (PVC) permitiram o desenvolvimento de um novo conceito de fabricação, incorporando a tecnologia de orientação molecular, com objetivo de obter produtos com melhorias notáveis em relação à tenacidade, rigidez, ductilidade, resistências à pressão hidrostática interna, ao impacto, ao cloreto de metileno, à compressão diametral, à deformação, fadiga e transmissão de fissuras (MOLL, 2010).

Esta tendência pode ser atribuída principalmente ao fato deste material poder, devido às suas propriedades físicas e mecânicas, ser empregado em substituição aos materiais tradicionais, como as ligas metálicas, aços e ferros fundidos, em diversas aplicações, nas áreas da construção civil e mecânica, infraestrutura urbana, adução de água e saneamento (CASTRO, 2004), particularmente quando da fabricação de tubulações para aplicação em grandes empreendimentos, como sistemas adutores, com maior qualidade final, maior flexibilidade de operação e rendimento hidráulico, com menor custo operacional e impactos ambientais e sociais associados.

Por essas razões, as indústrias de transformação plástica criaram uma nova classificação para os tubos DEFOFO, agora seguindo a Norma ABNT NBR 7665, que adota o PVC dúctil, aditivado com materiais modificadores de impacto, mais resistente à propagação de ruptura e mais tenaz. Mais tarde, foi introduzido o conceito de PVC-O, bi orientado (circunferencial e longitudinalmente), o qual também tem suas características de impacto e tenacidade muito melhoradas em relação ao PVC rígido tradicional. Este trabalho visa comparar, de forma inédita, as propriedades mecânicas finais dos tubos fabricados em PVC bi orientado e PVC DEFOFO dúctil, de forma a avaliar a influência e o resultado da orientação molecular nas características destes tubos.

1.1. Justificativas e necessidades para a realização da pesquisa

Nos últimos dez anos, têm surgido um crescente interesse na área de tecnologia de modificação dos produtos em PVC, embora a pesquisa acadêmica referente ao PVC e seu processos de fabricação com tecnologia de orientação molecular seja bastante limitada. Apesar do fato de que o PVC é o terceiro termoplástico em termos de

consumo mundial, totalizando 20% das mais de 140 milhões de toneladas consumidas em 2003 (CMAI, 2003), foi apresentado somente um trabalho sobre PVC com orientação molecular, no volume 23 da Revista Polímeros, edição de 2013. Além disso, ainda existe a deficiência de mapeamento de todos os métodos de ensaios mecânicos, de controle de qualidade e de performance, a serem inseridos nas Normas Técnicas Brasileiras e Internacionais vigentes, de forma a tornar os mesmos padronizados.

Também, até o presente momento não foi apresentado nenhum trabalho que apresente de forma efetiva o efeito da orientação molecular nas características e propriedades mecânicas finais de produtos fabricados em PVC, assim como conduza a uma análise comparativa entre as propriedades mecânicas finais de tubos fabricados por extrusão com e sem unidade de orientação molecular incorporada ao processo.

Ao mesmo tempo, pode-se dizer que a participação do PVC foi muito significativa em relação à demanda *per capita total* de termoplásticos no Brasil, que é de cerca de 35 kg/hab/ano (ABIPLAST, 2014), pondera-se que a capacidade instalada de PVC com orientação molecular, em virtude da demanda, na hipótese de substituição quase total dos tipos de ferro fundido, por exemplo, dimensiona o potencial de consumo brasileiro acima de 5.000 toneladas/ano (ARAÚJO, 2014).

O interesse da comunidade industrial por polímeros com a tecnologia de orientação molecular incorporada vem se sedimentando quanto às suas aplicações, equiparando-se aos materiais metálicos em vários aspectos construtivos e operacionais, com custos de fabricação e instalação bem menores, assim despertando também muito interesse da comunidade acadêmica no momento, por se tratar de uma solução sustentável e barata. Esta constatação pelo lado industrial foi realizada pelo autor em visita realizada nos anos de 2013 e 2014 a duas unidades fabris de uma das maiores fabricantes mundiais em produtos poliméricos, situadas em Suape-Ipojuca/PE e Sumaré/SP.

1.2. Conteúdo da dissertação

Esta dissertação está organizada em nove capítulos. O terceiro capítulo apresenta uma breve revisão de literatura referente a materiais plásticos, com e sem orientação

molecular, assim como uma explicação detalhada sobre os aspectos técnicos envolvidos na produção de tubos com orientação molecular biaxial.

O quarto capítulo abrange o dimensionamento, cálculo e comparação de parâmetros de projeto de tubos em PVC, com e sem orientação molecular.

O quinto capítulo descreve os procedimentos, materiais e métodos adotados para ensaiar mecanicamente os tubos em PVC, com e sem orientação molecular.

O sexto capítulo apresenta os resultados dos ensaios mecânicos e de performance em tubos em PVC, com e sem orientação molecular, assim analisando e discutindo o efeito da orientação molecular nas propriedades mecânicas finais dos mesmos.

O sétimo capítulo relata as considerações finais sobre todo o estudo realizado e apresenta recomendações e possibilidades para novos estudos sobre o tema.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Estudar o efeito da aplicação da tecnologia de orientação molecular para a melhoria das propriedades mecânicas finais de tubos fabricados em Policloreto de Vinila (PVC), aplicados em obras de adução de água e redes de esgotos pressurizados da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA).

2.2. Objetivos Específicos

- Descrever e analisar o processo de orientação molecular biaxial, dentro do escopo de fabricação de tubos de Policloreto de Vinila (PVC);
- Dimensionar, calcular e comparar os parâmetros de projeto de tubos em PVC, com e sem orientação molecular;
- Elaborar e padronizar métodos experimentais de preparação de amostras, visando a execução de ensaios mecânicos, de performance e controle de qualidade em tubos de PVC, com e sem orientação molecular;
- Realizar ensaios mecânicos, de performance e de controle de qualidade em tubos em PVC, com e sem orientação molecular, de forma a analisar o efeito da orientação molecular biaxial nas propriedades mecânicas finais dos mesmos.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Materiais Plásticos – Generalidades

Nas últimas décadas, avanços tecnológicos extraordinários na área de química de polímeros têm levado ao aparecimento de inúmeros materiais plásticos com excelente desempenho e baixo custo de produção. No entanto, estes materiais ainda são majoritariamente de origem petroquímica, o que tem permitido a manutenção de uma produção contínua e crescente a preços competitivos. Mais recentemente, várias pesquisas vêm sendo realizadas na tentativa de substituir os materiais petroquímicos por outros de caráter renovável, com o intuito de atribuir uma maior sustentabilidade ambiental aos processos de produção (ABIPLAST, 2014).

No Brasil, a indústria de polímeros já adquiriu importante status em termos de produção e expressão internacional em alguns setores, estando, atualmente, presente nos setores de calçados, resinas, tintas, automóveis, embalagens, têxteis, tubos para conexões, entre outros.

Desde o desenvolvimento das primeiras aplicações nestes diferentes nichos de mercado, os polímeros vêm sendo utilizados com inúmeras vantagens na fabricação de uma grande variedade de artefatos, conferindo-lhes propriedades mecânicas e físico-químicas muito superiores a outros tipos de materiais ditos convencionais (RODOLFO, 2006).

Na segmentação do mercado brasileiro de plásticos, quase da metade das aplicações até hoje desenvolvidas está voltada para os setores de construção civil, alimentos e bebidas, e automóveis e autopeças, com 16% e 15%, respectivamente. Outros setores importantes que juntos correspondem mais 38 % desta segmentação e, portanto, possuem uma parcela significativa do mercado são: de plástico e borracha, de papel, celulose e impressão, de máquinas e equipamentos, de agricultura, de móveis e de produtos metálicos. Já os setores de eletrônicos, farmacêutico, perfumaria, higiene e limpeza, instrumentos médicos, têxteis e vestuário, calçados, eletrodomésticos e

químico correspondem, juntos, a apenas 14% deste mercado, conforme dados mostrados na Figura 1.

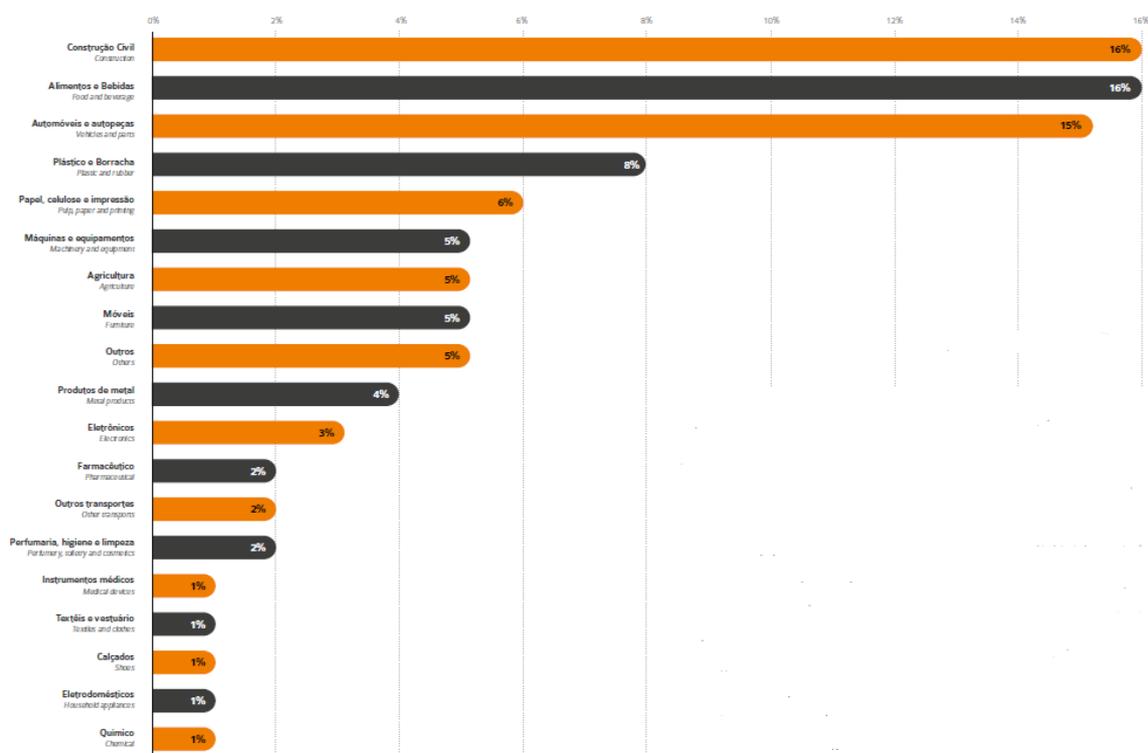


Figura 1. Segmentação do mercado brasileiro de plásticos em 2014 (ABIPLAST, 2014).

3.2. Resina de PVC

O PVC é o segundo termoplástico mais consumido em todo o mundo, com uma demanda mundial de resina superior a 59,9 milhões de toneladas no ano de 2014, sendo a capacidade mundial de produção de resinas de PVC estimada em cerca de 65,87 milhões toneladas/ano (ABIPLAST, 2014).

Desta demanda total, 19,4% foram consumidos na Argentina, 15,8% nos Países Baixos e 9,4% nos Estados Unidos (ABIPLAST, 2014). O Brasil foi responsável pelo consumo de cerca de 2,5% da demanda mundial de resinas de PVC. Estes dados mostram o potencial de crescimento da demanda de resinas de PVC no Brasil, uma vez que o consumo *per capita*, na faixa de 4,5 kg/habitante/ano, ainda é baixo comparado com estes e outros países.

O PVC pode ser considerado o mais versátil dentre os plásticos. Devido à necessidade da resina ser formulada mediante a incorporação de aditivos, o PVC pode ter suas características alteradas dentro de um amplo espectro de propriedades em função da aplicação final, variando desde o rígido ao extremamente flexível, passando por aplicações que vão desde tubos e perfis rígidos para uso na construção civil até brinquedos e laminados flexíveis para acondicionamento de sangue e plasma. A grande versatilidade do PVC deve-se em parte também à sua adequação aos mais variados processos de moldagem, podendo o mesmo ser injetado, extrudado, calandrado, espalmado, somente para citar algumas das alternativas de transformação. A Figura 2 ilustra os principais mercados nos quais o PVC tem participação no Brasil.

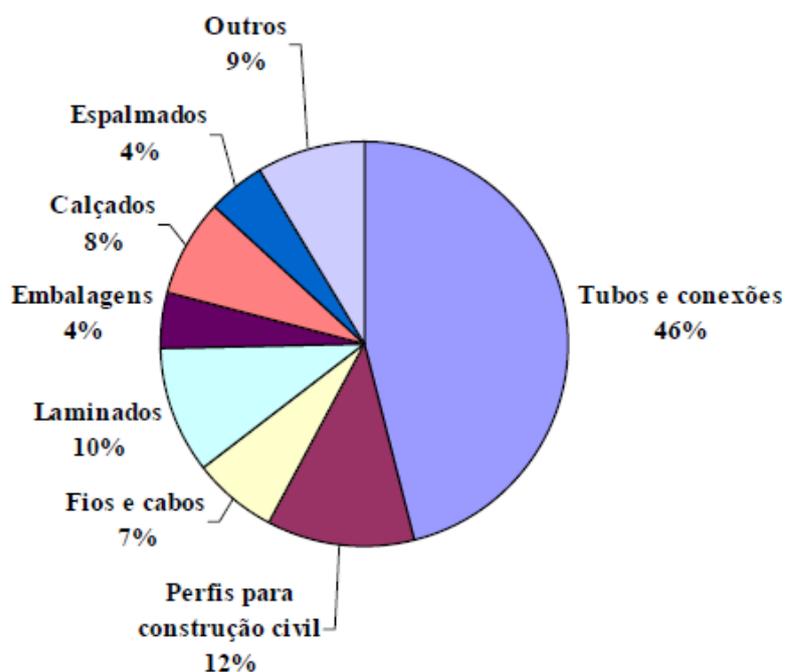


Figura 2. Principais aplicações do PVC no Brasil por segmento em 2014 (Braskem S/A, 2014).

As aplicações diretamente ligadas à construção civil e mecânica (tubos e conexões, perfis e fios e cabos) somam aproximadamente 65% da demanda total de PVC no Brasil. Nestas aplicações o PVC apresenta propriedades de interesse tais como resistência química e ao intemperismo, isolamento térmico e acústico, facilidade de instalação, baixa necessidade de manutenção e excelente acabamento e estética, dentre outras.

O PVC é caracterizado como um material de aplicações de longo ciclo de vida. Um estudo realizado pelo ECVM – *European Council of Vinyl Manufactures*, associação de classe representante de empresas ligadas à cadeia produtiva do PVC na Europa, estima que 68% do PVC seja utilizado nestes tipos de aplicações, ou seja, aplicações nas quais o tempo de vida útil do produto antes de seu descarte para o meio ambiente é bastante longo, por exemplo, superior a 10 anos (RODOLFO JR.; NUNES; ORMANJI, 2002).

O PVC é caracterizado como um material de aplicações nas quais o tempo de vida útil do produto, antes de seu descarte para o meio ambiente, é maior que 20 anos (RODOLFO, 2006). Por outro lado, o PVC é um polímero naturalmente resistente à propagação de chamas, o que permite a sua utilização em situações onde esta característica é desejada, como por exemplo, em fios e cabos elétricos, eletrodutos e forros e/ou revestimentos residenciais.

Dadas as suas propriedades, é natural que o PVC seja um dos termoplásticos mais consumidos em todo o mundo, com uma demanda mundial superior a 35 milhões de toneladas no ano de 2015, segundo a consultoria inglesa Harriman Chemsult (ADDCOMP, 2014; VINHAS, 2005).

O PVC está disposto em vários segmentos do mercado, desde a aplicação na construção civil e mecânica até o setor de embalagens. Uma representação esquemática da demanda mundial de PVC está representada na Figura 3.

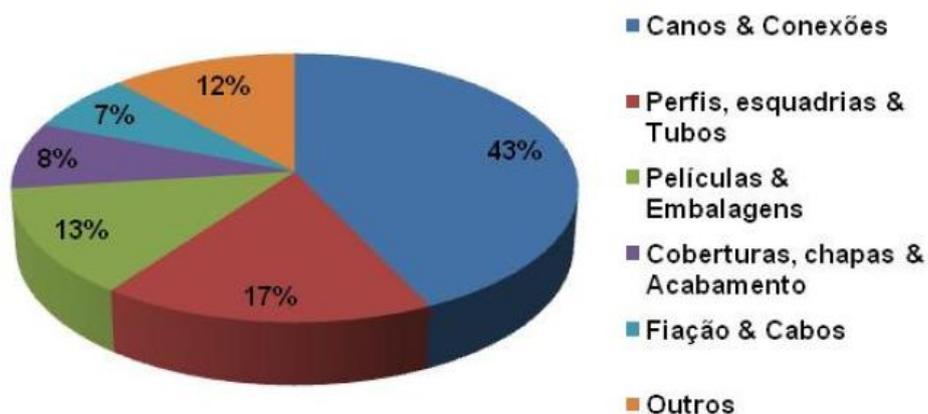


Figura 3. Demanda Global de PVC em 2014 (ADDCOMP, 2014).

O PVC também é considerado como o mais versátil dentre os plásticos. Devido à sua necessidade de ser formulado mediante a incorporação de processos de fabricação, o PVC pode ter suas características alteradas dentro de um amplo espectro de propriedades, variando desde o rígido até o extremamente flexível, passando por aplicações que vão desde tubos e perfis rígidos para a construção civil e mecânica até brinquedos e laminados flexíveis para acondicionamento de sangue e plasma (DEMIR, 2008; RODOLFO, 2006).

3.3. Estrutura do PVC – Obtenção e Morfologia de Partícula

O desenvolvimento do PVC teve início em 1835, quando Justus Von Liebig descobriu o monômero Cloreto de Vinila (MCV), um gás de propriedades interessantes cujo ponto de ebulição foi determinado como sendo igual a 13,8°C negativos. O primeiro registro da polimerização do MCV e da obtenção do PVC ocorreu em 1872, quando E. Baumann detalhou a mudança do aspecto do gás MCV induzido pela luz para um produto sólido branco, que imaginou ser um isômero do monômero de origem (SUMMERS, 1996; DONATO, 1972). O esquema para a obtenção do PVC a partir de seu monômero é mostrado na Figura 4 (CANEVAROLO, 2006).

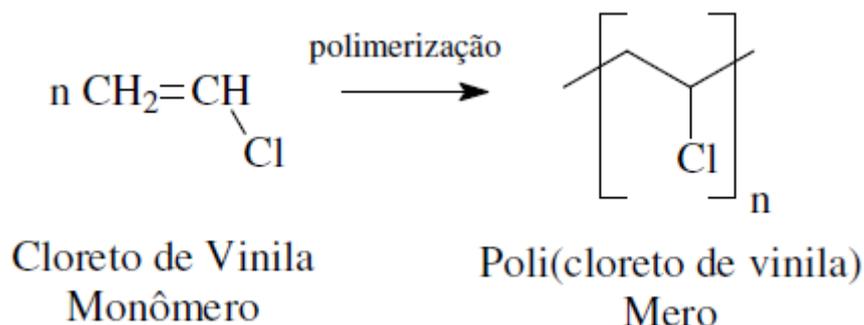


Figura 4. Polimerização do Cloreto de Vinila (Canevarolo, 2006).

Além disso, devido à sua estereoquímica e ao grande momento dipolar da ligação entre o cloro e o carbono, a molécula de PVC é relativamente polar (Figura 5), o que permite a sua mistura com uma gama de aditivos muito maiores do que qualquer outro termoplástico, possibilitando a preparação de formulações com propriedades e características adequadas às diferentes aplicações (CANEVAROLO, 2006; RODOLFO, 2006; SUMMERS, 1996).

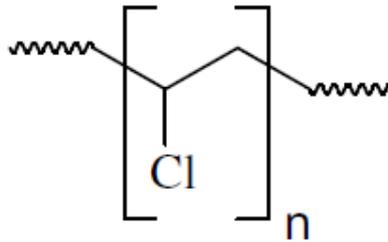


Figura 5. Estrutura do PVC (Canevarolo, 2006).

Em termos estequiométricos o PVC é obtido a partir de 57% de cloro, proveniente do cloreto de sódio, e 43% de insumos provenientes de fontes não renováveis como o petróleo e o gás natural (TACIDELLI, 2009; YONGZHONG, 2008; RODOLFO, 2006).

O cloro presente na estrutura molecular do PVC é proveniente do sal marinho ou do cloreto de sódio mineral (sal-gema), uma fonte praticamente inesgotável de matéria-prima. Além do uso na produção do PVC, correspondente a cerca de 34% de sua demanda mundial, o cloro é utilizado em aplicações nas indústrias de cosméticos, revestimentos, purificação de água, papel e celulose, desinfetantes para piscinas, agricultura e indústria farmacêutica, dentre outras (CMAI, 2003). Devido ao seu processo de obtenção, baseado na eletrólise de uma mistura de sal e água, o cloro deve ser utilizado em balanço com a soda cáustica. O processo ainda fornece hidrogênio, normalmente utilizado como combustível nas próprias plantas de eletrólise para geração de energia.

A presença do átomo de cloro em sua estrutura molecular torna o PVC um polímero naturalmente resistente à propagação de chamas, contribuindo para aplicações nos quais a baixa inflamabilidade é item obrigatório, principalmente em aplicações ligadas à construção civil e mecânica, tais como em fios e cabos elétricos, eletrodutos e forros e tubulações.

O átomo de cloro atua ainda como um marcador nos produtos em PVC, permitindo a separação automatizada dos resíduos de itens produzidos com este material misturados com outros plásticos em meio ao lixo sólido urbano, facilitando assim sua separação para reciclagem.

Várias técnicas de polimerização têm sido empregadas para a obtenção do PVC e, dentre elas, as mais comumente utilizadas são as baseadas na polimerização em emulsão, em micro-emulsão e em suspensão. Aproximadamente 80% do PVC consumido no mundo é produzido através da polimerização do monômero cloreto de vinila em suspensão. Este processo permite a obtenção de resinas de PVC adequadas à produção de tubos e conexões, perfis, isolamentos de fios e cabos elétricos, dentre outros.

Pelos processos de polimerização em emulsão e micro suspensão (10 a 15%) obtêm-se resinas que são empregadas basicamente em compostos líquidos conhecidos como plastissóis. Os processos de polimerização em massa e em solução são outras técnicas também empregadas na obtenção do PVC e possuem pouca representatividade no consumo total desta resina.

No processo de polimerização em suspensão, o MCV ou monômero cloreto de vinila é disperso na forma de gotas de diâmetro entre 30 e 150 μm , em meio a uma fase aquosa contínua através de agitação vigorosa e na presença de um colóide protetor, também chamado dispersante ou agente de suspensão. Um iniciador solúvel no monômero é utilizado, de modo que a reação de polimerização ocorra dentro das gotas em suspensão, por um mecanismo de reações em cadeia via radicais livres (CLARK, 1982).

A morfologia de partícula definida durante a polimerização influencia fortemente a processabilidade e as propriedades físicas do produto final. As resinas de PVC obtidas pelo processo de polimerização em suspensão consistem de partículas com diâmetro normalmente na faixa de 50 a 200 μm , partículas estas de estrutura interna bastante complexa. Esta faixa de tamanho de partícula é adequada tanto do ponto de vista das dificuldades de manipulação e riscos ocupacionais associados a partículas muito finas, quanto no sentido de evitar instabilidades na suspensão (a ponto de solidificar a carga no reator) no caso de partículas muito grosseiras (TITOW, 1984; NASS; HEIBERGER, 1986).

A Figura 6 mostra uma partícula ou grão de PVC obtido pelo processo de suspensão tal como aparece no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Se esta

partícula é cortada de modo a revelar sua estrutura interna, tal como mostrado na micrografia da Figura 7 observa-se que seu interior é formado de aglomerados de pequenas partículas com diâmetro na faixa de 1 μm , chamadas de partículas primárias. Observa-se facilmente nas Figuras 6 e 7 que o volume entre estas partículas primárias é o responsável pela porosidade da resina, característica esta que torna o processo de incorporação dos aditivos ao PVC possível, através da ocupação deste volume livre.

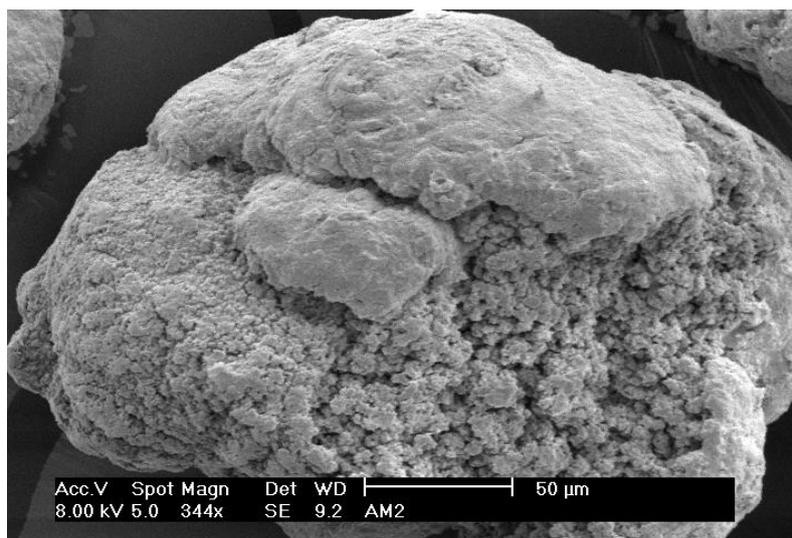


Figura 6. Partícula de PVC obtido pelo processo de polimerização em suspensão visualizada no microscópio eletrônico de varredura (MEV), com aumento de 645x (Rodolfo Jr.; Nunes; Ormanji, 2006).

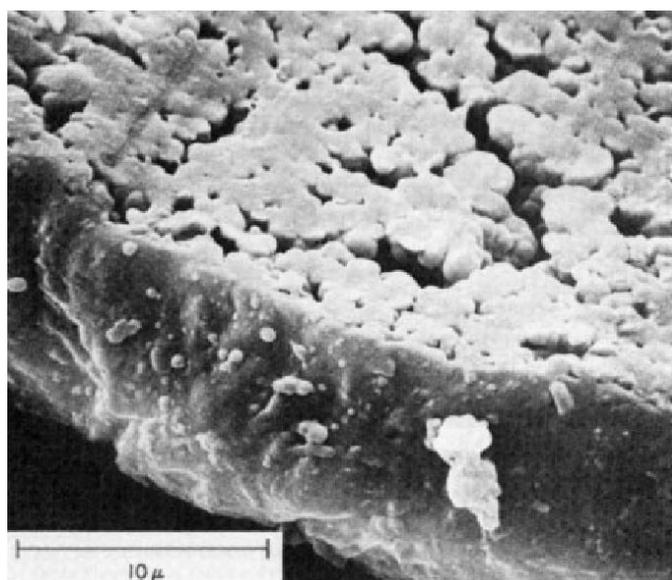


Figura 7. Micrografia de uma partícula de PVC obtida pelo processo de polimerização em suspensão, cortada de modo a exibir sua estrutura interna e observada através do microscópio eletrônico de varredura (Nass; Heiberger, 1986).

3.4. Características e Processamento do PVC

O PVC é um termoplástico amorfo da família dos vinílicos que contém aproximadamente 56 % de cloro em peso, temperatura de deflexão térmica 68°C e transição vítrea 75°C (DANIELETTO, 2007). Devido a sua alta sensibilidade a temperatura (instabilidade), o PVC não pode ser processado de maneira pura, exigindo a formação de compostos com estabilizantes de temperatura, lubrificantes, plastificantes, modificadores de impacto e cargas (normalmente carbonato de cálcio).

Essa característica é um complicador na avaliação de tubos em PVC, pois a quantidade destes aditivos é, via de regra, critério do transformador, o que pode levar a materiais de desempenhos muitos diferentes. Em função dos aditivos, em especial plastificantes e cargas, podem resultar em tubos flexíveis, como as mangueiras de jardins, ou rígidos, como os tubos para baixa pressão.

Outra característica é a rigidez dos tubos, pois se adequada para certas aplicações, entretanto torna-os menos resistentes a impactos e a transientes hidráulicos, exigindo análise cuidadosa, especialmente de tubos finos, adutoras de água sob pressão e travessias de ruas e rodovias de tráfego intenso e pesado.

3.4.1. Moldagem por extrusão

O processo de moldagem por extrusão é uma das técnicas de processamento mais úteis e das mais utilizadas para converter compostos de PVC em produtos comerciais. Considera-se que entre 45 e 50% de todos os produtos de PVC são obtidos por meio do processo de moldagem por extrusão.

A capacidade do PVC de aceitar várias modificações por meio da incorporação de aditivos permite seu uso numa ampla diversidade de produtos, dentre os quais filmes para embalagens, fios e cabos elétricos, chapas, perfis diversos e tubos (RODOLFO JR.; NUNES; ORMANJI, 2006).

O processo de extrusão consiste basicamente em forçar a passagem do material por dentro de um cilindro aquecido de maneira controlada, por meio da ação

bombeadora de uma ou duas roscas sem fim, que promovem o cisalhamento e homogeneização do material, bem como sua plastificação. Na saída do cilindro o material é comprimido contra uma matriz de perfil desejado, a qual dá formato ao produto, podendo o mesmo em seguida ser calibrado, resfriado, cortado ou enrolado.

Os tubos termoplásticos, entre outros, são produzidos por processo de extrusão contínua, onde a princípio, os tubos podem ser produzidos com qualquer comprimento.

A matéria-prima é sugada por alimentadores a vácuo para dentro de um funil de secagem a ar quente, que fica ao lado ou sobre a extrusora. Neste funil, a matéria-prima é desumidificada através da circulação de ar quente. A depender das condições dos materiais e da umidade do ambiente, podem ser necessários equipamentos de secagem mais sofisticados, que geram ar seco.

A matéria-prima é transportada via vácuo para o funil de alimentação sobre a extrusora (exceto quando o funil de secagem já é colocado sobre a extrusora, substituindo o funil de alimentação) e cai por gravidade para dentro do cilindro da extrusora.

Em alguns casos, o material é automaticamente monitorado por um controle (balança) gravimétrico, a qual mede e controla a quantidade de material, em quilogramas por hora, sendo este posteriormente alimentado na extrusora, através do controle de rotação da rosca. Com isso, há maior controle sobre o processo, assegurando maior uniformidade de peso, espessura dos tubos e menores perdas. A Figura 8 mostra um Sistema de Alimentação, Desumidificação e Secagem de Matéria-Prima em uma Extrusora.

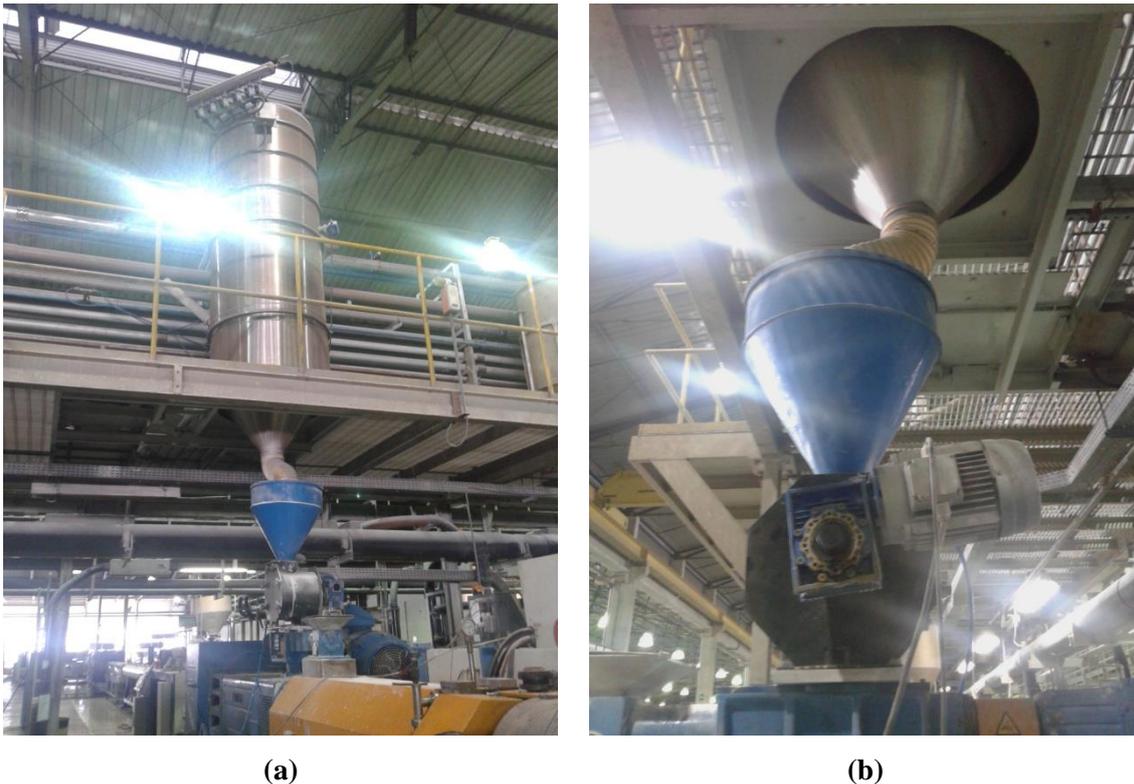


Figura 8. Sistema de Alimentação, Desumidificação e Secagem de Matéria-Prima em uma Extrusora: (a) sistema de alimentação a vácuo; (b) funil de alimentação e sistema de controle de matéria-prima (Mexichem, 2015).

A extrusora, propriamente dita, consiste de um cilindro e de uma rosca interna, tipo sem fim, que gira acionada por moto-redutor, mais comumente de corrente contínua, com velocidade precisamente controlada. A extrusora pode ainda ser compreendida como uma bomba de parafuso, cuja função é plastificar o material e manter a vazão constante.

A rosca, ao girar, impulsiona o material para frente, ao mesmo tempo em que o cisalha, provocando sua fusão, de maneira que na extremidade de saída do cilindro o material encontra-se perfeitamente fundido e homogeneizado, com viscosidade ideal para ser moldado.

O cilindro é todo envolto em aquecedores elétricos, tendo as temperaturas controladas por pirômetros eletrônicos de precisão em zonas distintas ao longo do cilindro. Os pirômetros acionam ora o aquecimento e ora o resfriamento, através de circulação de água por serpentinas ao longo do cilindro, ou acionando ventiladores, de forma a manter a temperatura dentro do valor pré-estabelecido, gerando um perfil de

temperatura adequado. A somatória do calor gerado pelos aquecedores e pela rosca leva o material à fusão.

A zona do cilindro/rosca correspondente à entrada do material (zona de alimentação e transporte) deve manter a temperatura abaixo da temperatura de fusão do polímero. Essa zona deve ter um sistema de refrigeração controlado por fluido térmico (água ou óleo) e serpentina que envolve o cilindro, evitando que o calor gerado pela rosca interfira na zona de transporte, mantendo-a bastante estável, visando alimentação e vazão constante da extrusora. A Figura 9 mostra as Zonas de Alimentação, Plastificação, Cisalhamento, Fundição e Transporte em uma Extrusora.

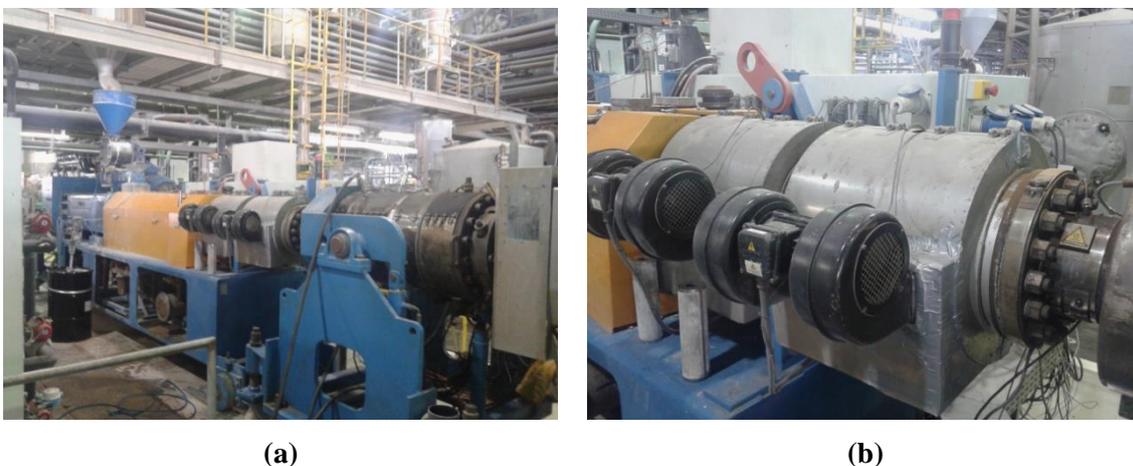


Figura 9. Zonas de Alimentação, Plastificação, Cisalhamento, Fundição e Transporte em uma Extrusora: (a) vista geral do equipamento; (b) aquecedor elétrico (Mexichem, 2015).

Na saída da extrusora acopla-se o conjunto cabeçote e matriz. O cabeçote tem por objetivo equalizar o fluxo da massa fundida e direcioná-la para dentro da matriz, de onde resultará uma massa já em forma tubular, porém em estado fundido. Cada cabeçote suporta uma gama de matrizes. Desta forma, dentro de uma faixa de diâmetros, trocam-se apenas as matrizes internas e externas correspondentes à dimensão desejada.

A massa fundida já em forma tubular entra no calibrador de diâmetro, geralmente contendo também um tanque de calibração a vácuo. Este tanque é composto por uma câmara de vácuo, com aspersores de jato d'água, anéis e cilindros calibradores. Quando a massa tubular entra no tanque de vácuo esta se expande, em função do vácuo gerado dentro do tanque, até conformar-se no cilindro calibrador e anéis de calibração,

ao mesmo tempo em que resfriada pelos jatos d'água, passando a adquirir consistência. A Figura 10 mostra as Zonas de Equalização de fluxo de Massa, Formatação e Calibração em uma Extrusora.



Figura 10. Zonas de Equalização de fluxo de Massa, Formatação e Calibração em uma Extrusora: (a) cabeçote; (b) calibrador de diâmetro e tanque de calibração (Mexichem, 2015).

Ao sair do tanque de calibração, o tubo entra nos banhos de resfriamento, que são tanques fechados, providos de vários aspersores de água, dispostos circularmente ao tubo, propiciando um resfriamento lento e uniforme.

Na saída dos banhos de resfriamento, o tubo já está com sua dimensão final e, continuamente, para pela impressora a quente (*hot stamping*), onde será marcado em baixo relevo, fundido uma fita plástica colorida ressaltando os dizeres. Atualmente, as impressoras a jato de tinta vêm ganhando mercado, embora esse tipo de marcação ainda não seja aceito em todas as normas de tubos.

Acoplado à impressora ou ao puxador há um dispositivo contador de metros produzidos, normalmente provido de alarme sonoro e luminoso e que também dá o sinal elétrico para acionamento da serra de corte, no comprimento pré-determinado das barras e bobinas.

A seguir o tubo entra no puxador ou arraste, que vem a ser um conjunto de esteiras de borracha, que puxam o tubo para fora, ou segura-o. Com a vazão de massa constante garantida pela extrusora, a espessura do tubo é controlada pela velocidade de

puxamento, ou seja, aumentando-se a velocidade a espessura diminui, e vice-versa. Do perfeito sincronismo da velocidade de puxamento e da vazão da extrusora, resulta a constância da espessura do tubo. Daí a exigência de boa precisão e controle de velocidade por parte do equipamento. Os equipamentos mais modernos possuem controles computadorizados que mantêm o sincronismo da extrusora e puxador.

Na saída do puxador encontra-se a serra, tipo circular, planetária ou guilhotina, conforme dimensão do tubo. A serra é acionada eletronicamente pelo contador de metros, ou através de uma chave fim-de-curso eletromecânica posicionada à distância igual ao comprimento desejado da barra.

Quando em barras, após o corte, opcionalmente os tubos podem passar por um sistema de calhas basculantes, onde cada barra que passa por ele é deslocada para fora da linha, ficando armazenada lateralmente. A Figura 11 mostra as Zonas de Resfriamento, Impressão, Arraste, Corte e Formatação da Bolsa na Extrusora.



(a)



(b)



(c)



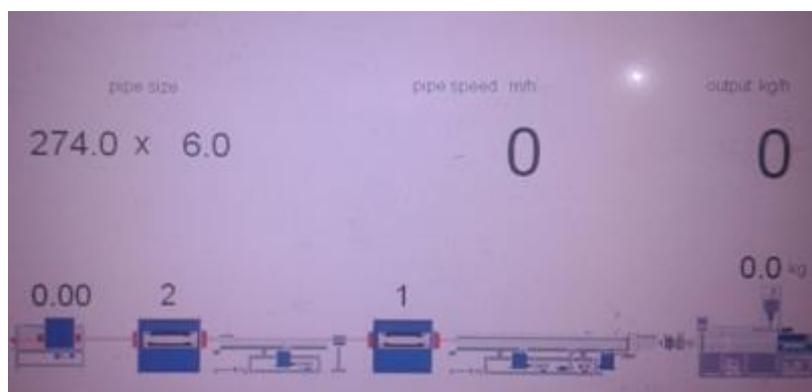
(d)



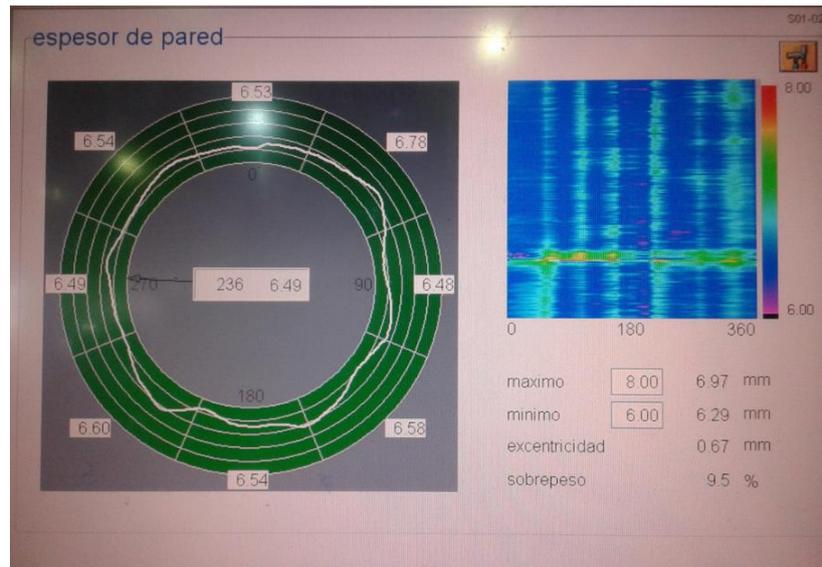
Figura 11. Zonas de Resfriamento, Impressão, Arraste, Corte e Formatação da Bolsa uma Extrusora: (a) tanque de resfriamento; (b) impressora a quente; (c) puxador; (d) serra de corte; (e) bolsadeira; (f) paletizador (Mexichem, 2015).

A qualidade e a uniformidade da produção por extrusão está na precisão e controle dos parâmetros do processo, onde podemos destacar a rotação da rosca da extrusora, perfil de temperaturas do cilindro, temperatura e pressão da massa fundida, vácuo do calibrador, temperatura de resfriamento e velocidade do puxador.

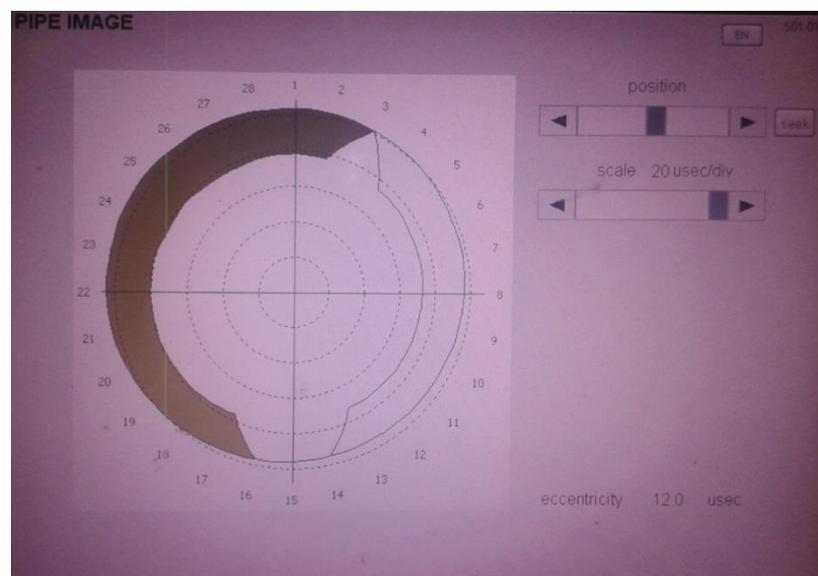
Estes quatro parâmetros iniciais definem a viscosidade do fundido. Do controle em tempo real da viscosidade resulta a uniformidade da vazão da massa e do tubo, bem como a garantia de propriedades mecânicas do mesmo. Enquanto que outros parâmetros interferem mais diretamente nas dimensões do tubo e nas tensões residuais de resfriamento. A Figura 12 mostra alguns controles dos parâmetros do processo de extrusão.



(a)



(b)



(c)

Figura 12. Controles dos parâmetros do processo de extrusão: (a) controle de velocidade; (b) controle de espessura de parede; (c) controle de excentricidade (Mexichem, 2015).

Como as matérias primas não contêm suas características físicas e reológicas absolutamente constantes, ou seja, densidade e distribuição de peso molecular podem variar dentro de tolerâncias relativamente largas, e ainda essas propriedades variam em função da temperatura e pressão, a linha de extrusão deve ser capaz de manter os parâmetros bastante estáveis e até compensar as variações do material, mantendo a vazão, a pressão e a temperatura da massa plastificada.

Para tanto, alguns fabricantes incorporam à linha de extrusão equipamentos complementares, como controle gravimétrico, bomba de polímero, controle de espessura por ultrassom “*in-line*” e centralizadores de matrizes, computadorizados, que se interligam e passam a gerenciar automaticamente toda a máquina, corrigindo desvios de parâmetros, mantendo o dimensional dentro de tolerâncias bastante estreitas e fornecendo relatórios completos sobre a produção: perdas, desvios, espessuras, diâmetros e comprimentos.

3.4.2. Extrusoras de Rosca Dupla

Extrusoras de rosca dupla podem ser divididas em paralelas, nas quais as roscas apresentam o mesmo diâmetro ao longo de todo o seu comprimento, e cônicas, nas quais as roscas possuem diâmetro progressivamente reduzido ao longo de seu comprimento.

Com relação ao acionamento das roscas, as extrusoras paralelas podem ter roscas de acionamento contra-rotacional, ou seja, roscas de movimento de giro oposto (mais adequadas ao processamento do PVC), ou roscas de acionamento co-rotacional, nas quais o movimento de giro das roscas se dá no mesmo sentido (menos indicadas ao processamento do PVC devido à sua sensibilidade ao excessivo cisalhamento). Extrusoras cônicas apresentam roscas de movimento contra-rotacional. A Figura 13 mostra, esquematicamente, os dois tipos de extrusoras de rosca dupla.

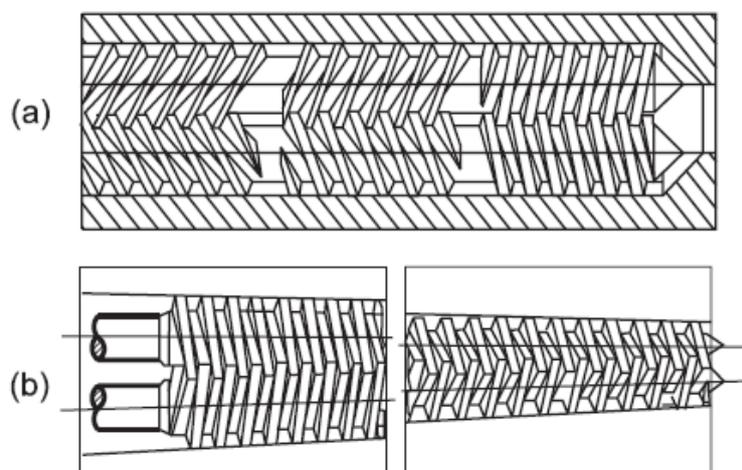


Figura 13. Tipos de extrusoras de rosca dupla: (a) paralela; (b) cônica (Rodolfo Jr.; Nunes; Ormanji, 2006).

Segundo (RODOLFO JR.; NUNES; ORMANJI, 2006), as extrusoras de rosca dupla, apesar do maior custo, apresentam uma série de vantagens em relação às extrusoras de rosca simples, as quais podem ser assim listadas:

- (a) maior eficiência na gelificação (ALVES, 2006), plastificação e homogeneização do composto, em função da geometria de rosca mais elaborada, que permite a inclusão de uma série de elementos de mistura e cisalhamento ao longo de seu comprimento. Na prática, menores temperaturas de processamento podem ser utilizadas, ou seja, formulações mais econômicas podem ser elaboradas pela redução da necessidade de estabilizantes térmicos e lubrificantes no composto;
- (b) maior eficiência no transporte de massa, ou seja, menor variação da vazão de composto na matriz, com efeitos benéficos na precisão dimensional do produto final;
- (c) maior produtividade em função da possibilidade de operação em condições de processamento mais severas que as permitidas com as extrusoras de rosca simples;
- (d) menor consumo de energia em função da maior eficiência de transferência de energia mecânica.

3.4.3. Comportamento reológico do composto de PVC rígido no processo de Extrusão

O PVC rígido apresenta alta viscosidade quando no estado fundido, fazendo-se necessários cuidados especiais no projeto da extrusora, uma vez que seu processamento se dá sob regime de alto torque em motores elétricos, roscas, eixos e acoplamentos. A alta viscosidade do fundido também impõe maiores pressões ao processo, tornando necessário projeto adequado do cilindro, matrizes e seus acoplamentos.

A correta estabilização e lubrificação do composto de PVC é particularmente importante no caso de compostos de PVC rígido em função da severidade das condições de processamento, de modo a garantir sua integridade ao longo de todo o processo, bem como na vida útil do produto. Temperaturas típicas de processamento de compostos

rígidos de PVC variam na faixa de 150 a 220° C (RODOLFO JR.; NUNES; ORMANJI, 2006).

3.4.4. Principais processos de fabricação de produtos de PVC baseados em extrusão

Dependendo da forma de apresentação do composto de PVC, o mesmo recebe denominações distintas. Para os compostos produzidos a partir da aditivação de resinas de PVC obtidas pelo processo de polimerização em suspensão, temos:

Dry Blend: composto na forma de pó, obtido após mistura da resina com os aditivos em misturadores intensivos. Devido à porosidade inerente das partículas de PVC obtido pelo processo de polimerização em suspensão, os aditivos líquidos são absorvidos pelas mesmas e a mistura final apresenta-se na forma de um pó seco de fluxo livre. Alguns processos de transformação, principalmente no caso de compostos rígidos, utilizam o composto na forma de *dry blend* diretamente para alimentação dos equipamentos de transformação;

Composto granulado: o composto na forma de pó (*dry blend*) pode sofrer um processo de plastificação e homogeneização em uma extrusora, que ao final desse processo transforma o *dry blend* em pequenos grânulos regulares. Em alguns processos de transformação, particularmente nos casos de compostos flexíveis e injeção de compostos rígidos e flexíveis, é especialmente recomendada a alimentação do composto na forma granulada, para garantir maior regularidade de produção e melhor qualidade do produto final obtido.

3.4.5. Extrusão de tubos rígidos de PVC

A produção de tubos rígidos de PVC normalmente é feita por meio da utilização de extrusoras de rosca dupla, a partir do composto na forma de *dry blend*. No passado utilizavam-se extrusoras de rosca simples, principalmente em tubos de menores diâmetros, porém essa tecnologia hoje apresenta pouca competitividade em relação à extrusão com rosca dupla, que pode atingir produtividade da ordem de 1.000 kg/hora.

O processo de produção de tubos rígidos de PVC inicia-se na extrusora, responsável pela gelificação, plastificação e homogeneização do composto originalmente na forma de pó. Uma vez fundido, o composto alimenta a matriz, responsável pela conformação do material na forma do produto final. À saída da matriz encontra-se um calibrador a vácuo, o qual resfria o material fundido e dá dimensões ao produto final.

Para linhas de maior produtividade ou em tubos de maiores espessuras é comum a utilização de água gelada no resfriamento do calibrador, de modo a conseguir maiores taxas de remoção de calor.

Na sequência do calibrador propriamente dito, dentro da própria câmara de vácuo, o tubo passa por uma série de jatos de água para resfriamento adicional. Nas linhas de alta produtividade ou na produção de tubos de maiores espessuras podem ainda ser incorporadas banheiras adicionais de resfriamento. À frente da linha encontram-se o puxador e o dispositivo de corte e recepção das barras cortadas.

Uma vez cortadas, as barras passam por um dispositivo de formação da bolsa: por meio de aquecimento de uma de suas pontas, o tubo recebe um macho que ajusta o diâmetro interno do tubo para perfeito acoplamento entre as barras. Outros tipos de tubos podem sofrer processos de incorporação de roscas machos e fêmeas, como no caso de tubos para irrigação, ou ainda incorporação de juntas de borracha para garantir estanqueidade na junção ponta/bolsa. A figura 14 mostra esquematicamente o processo de extrusão de tubos de PVC.

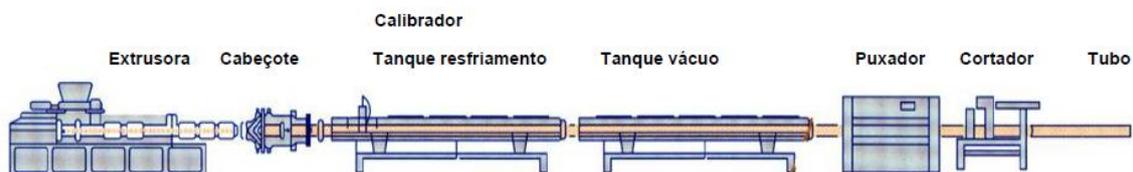


Figura 14. Processo de extrusão de tubos de PVC (Rodolfo Jr.; Nunes; Ormanji, 2006).

Com relação à matriz vale comentar que a mesma deve ser projetada para suportar altas pressões, principalmente nas máquinas de maior produtividade. O projeto deve ainda levar em conta a ausência de “*pontos mortos*” ou pontos de estagnação, ou

seja, pontos de pouca ou nenhuma velocidade de fluxo do composto no interior da matriz.

Devido à sensibilidade inerente do PVC à temperatura, o mesmo pode sofrer degradação nesses pontos de retenção, causando problemas de marcas nos tubos e fazendo com que o processo tenha de ser interrompido com maior frequência para abertura e limpeza do ferramental, com impacto direto nos custos de produção devido à perda de horas produtivas e descarte de material devido à necessidade de novos ajustes na partida do equipamento.

A Figura 15 mostra esquematicamente uma matriz típica para extrusão de tubos de PVC. Observam-se os principais componentes da matriz: flange de acoplamento à extrusora, torpedo, aranha (ou cruzeta), macho e matriz, responsáveis pela conformação do composto fundido no formato do tubo.

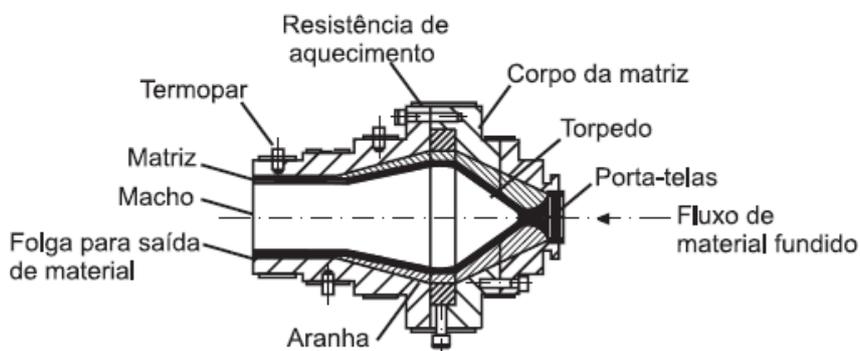


Figura 15. Representação esquemática de uma matriz típica para extrusão de tubos de PVC (Rodolfo Jr.; Nunes; Ormanji, 2006).

3.5. Orientação Molecular

Para os polímeros em geral, devido à baixa energia de ruptura frente aos metais, normalmente em aplicações técnicas é de grande interesse qualquer mecanismo que tenacifique ou melhore de alguma forma as propriedades mecânicas do polímero. São usados diversos mecanismos, desde o ajuste de parâmetros em máquinas de transformação até reforços com fibras sintéticas e minerais, passando pelo uso de resinas com maior peso molecular, uso de cargas especiais e processo de orientação molecular (ALBUQUERQUE MEDEIROS; WIEBECK, 2013).

Os polímeros são constituídos por cadeias moleculares longas, formadas por repetições de uma estrutura química, cujas propriedades são inerentes à geometria e composição dessa estrutura. Esses fatores, associados ao modo como as cadeias interagem e se agrupam umas sobre as outras, determinam o comportamento térmico e mecânico do polímero.

À medida que as cadeias acomodam-se durante o resfriamento pós-processamento, podem-se criar estruturas organizadas com elevada energia de coesão, denominadas cristalitos. Há polímeros onde a fração em volume de cristalitos é significativa, denominados semicristalinos. Nessa classe, podem-se encontrar diversos núcleos compostos de cadeias ordenadas agrupadas lado a lado. Ligando esses núcleos há uma segunda fase amorfa, composta por cadeias enoveladas, algumas participando de dois ou mais cristalitos. Outros polímeros como o Poliestireno ou Poli metacrilato de metila “Acrílico”, são considerados “amorfos”, todo o volume apresenta-se desordenado, sem regiões cristalinas. O PVC, apesar de considerado e tratado de forma geral como polímero amorfo, apresenta pequeno volume cristalino.

Assim como outros polímeros, o PVC pode ter as propriedades mecânicas melhoradas quando se orientam as cadeias moleculares no sentido da solicitação. Orientar um polímero significa alinhar suas cadeias macromoleculares numa direção ou plano determinado, ao invés de deixá-las desordenadas e emaranhadas umas nas outras (MANRICH, S, 2005).

Para facilitar essa operação, o polímero é aquecido acima da temperatura de transição vítrea (T_g), que geralmente varia em torno de 75°C , onde as cadeias da fase amorfa adquirem mobilidade e o material passa do sólido vítreo ao borrachoso e flexível. Nesse estado é necessária menor energia para deformar o material, já que as forças intermoleculares estão enfraquecidas. Então é feito o estiramento da peça na direção de interesse. Em seguida (e mantendo a peça na posição “estirada”) a peça é resfriada rapidamente, a fim de congelar as microestruturas alinhadas.

3.5.1. Tipos de orientação molecular

A orientação molecular de polímeros pode ser feita a partir de materiais semicristalinos como Polipropileno (PP) e Politereftalato de Etileno (PET) ou amorfos como Poliestireno (PS), Polimetilmetacrilato (PMMA) ou mesmo o PVC. Sabe-se que o potencial de melhoria no desempenho mecânico quando orientado é maior para os semicristalinos (MANRICH, S, 2005), mas há vantagens significativas nos termoplásticos amorfos.

O processo pode envolver apenas um eixo de orientação, como ocorre axialmente em fibras sintéticas, onde a resistência à tração é aumentada com orientação monoaxial, ou envolver dois eixos (produtos “bi orientados”), axialmente e radialmente, como nos filmes plásticos “BOPP”, telhas de PVC “Ondex®” (RENOLIT ONDEX, 2008), embalagens de refrigerante em PET, tubos “Biax®” (MEXICHEM, 2009), dentre outros.

A Figura 16 mostra uma visão esquemática dos processos de orientação monoaxial e biaxial:

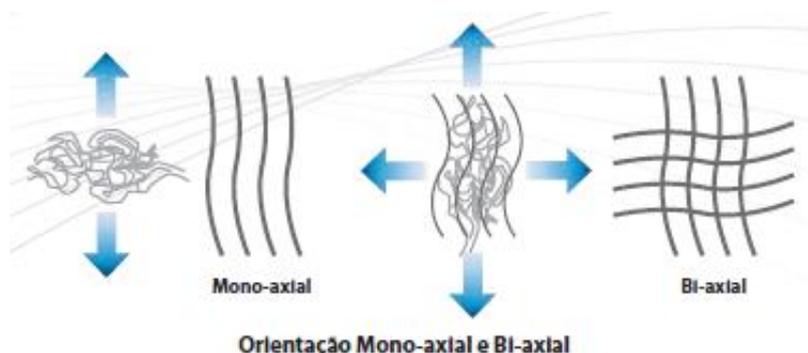


Figura 16. Visão esquemática dos processos de orientação monoaxial e biaxial (Adaptado do Manual Técnico da Linha de tubos BIAx – Mexichem, 2009).

3.5.2. Moldagem por Extrusão com Orientação Molecular Biaxial

Quando produzido da forma convencional, o PVC desliza pela parede da matriz devido aos aditivos típicos usados no processo de transformação, havendo pouca orientação no sentido do fluxo. Ainda, considerando os sistemas de puxamento e

resfriamento comuns às linhas atuais de extrusão de tubos, o PVC, ao sair da matriz, adquire pouca ou nenhuma orientação, à medida que o estiramento provocado pelo puxador da linha é pequeno e a temperatura alta demais para a formação e manutenção significativa da orientação. Em altas temperaturas (em torno de 200 °C para o PVC rígido), as forças intermoleculares são muito reduzidas e a recuperação da orientação causada pelo puxamento é quase instantânea e total.

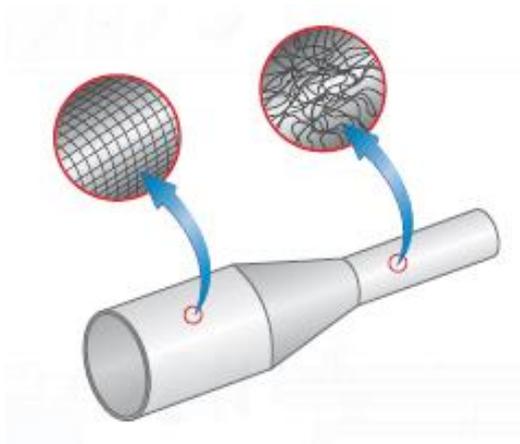
Nas décadas de 80 e 90 foi desenvolvido um processo de orientação molecular de tubos de PVC (PVC-O), a fim de melhorar o desempenho mecânico do produto para transporte de água sob pressão e evitar falhas por impacto e/ou perfuração no transporte/instalação, por trincas devido à deformação do terreno de instalação ou ruptura provocada por picos na pressão da água.

Inicialmente o processo “em batelada” era realizado através da extrusão de uma pré-forma com menor diâmetro que o tubo final e parede mais espessa. A pré-forma seguia então para o acoplamento a uma câmara, para reaquecimento, estiramento e resfriamento, barra a barra (FUMIRE, 2008).

Mais tarde, no início dos anos 2000, o processo foi desenvolvido e surgiu bi orientação contínua, sendo as barras orientadas nos sentidos dos principais esforços solicitantes (circunferencial e longitudinal), antes do corte na linha de extrusão (FUMIRE, 2008). Resumidamente, a pré-forma é pré-aquecida em uma unidade de controle térmico, conhecida como “forno de orientação”, mostrada na Figura 17. Posteriormente a mesma é extrudada (também com menor diâmetro e maior espessura de parede que o tubo final) e sob temperatura adequada, passa sobre um mandril com maior diâmetro externo que o diâmetro interno do extrudado, orientando o tubo circunferencialmente, enquanto um puxador encarrega-se de orientar a componente axial, paralela à linha de extrusão, puxando o tubo em velocidade maior que a de extrusão da pré-forma, conforme mostrado na Figura 18. Todo este processo é realizado em um sistema conhecido como “Unidade de Orientação”, mostrada na figura conforme ilustrado na Figura 19.



Figura 17. Unidade de Controle Térmico para Pré-aquecimento de Pré-formas para Orientação Molecular (Mexichem, 2015).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 18. Processo de Orientação Molecular Biaxial: (a) Visão Esquemática da Expansão da pré-forma; (b) Visão Real da Expansão da pré-forma; (c) Mandril de Orientação Molecular (d) Puxador (Mexichem, 2015).



Figura 19. Unidade de Orientação Molecular Biaxial (Mexichem, 2015).

O mandril de orientação molecular é composto por três zonas distintas, conforme mostrado na Figura 20. Na região de orientação molecular ocorre o fluxo de água quente a cerca de 95°C. Após a região de orientação molecular o resfriamento a cerca de 20°C, para congelar as microestruturas alinhadas. Após o resfriamento, ocorre o controle dimensional através do anel de calibração.

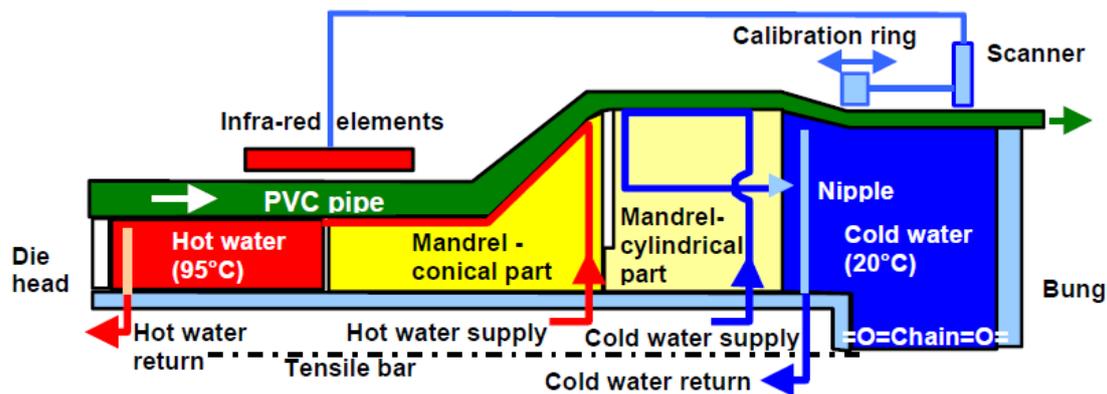


Figura 20. Composição do Mandril de Orientação Molecular (Mexichem, 2015).

A fabricação ocorre em linha, conforme é ilustrado na Figura 21, através de um processo automático contínuo, que permite controle preciso dos seguintes fatores (MOLL, 2010):

- Temperatura do composto de PVC ao longo de toda a linha;
- Espessura de parede e diâmetro externo do tubo;
- Grau de orientação circumferencial e longitudinal.

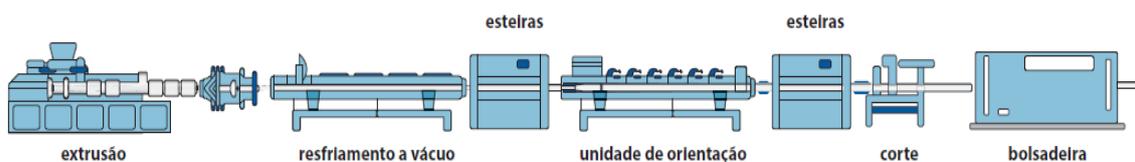


Figura 21. Linha de extrusão contínua do PVC-O (Adaptado do Manual Técnico da Linha de tubos BIAX – Mexichem, 2009).

À medida que se desenvolve a bi orientação, surge uma estrutura lamelar concêntrica, como camadas sobrepostas de um tecido. Estas camadas são mostradas na Figura 22.

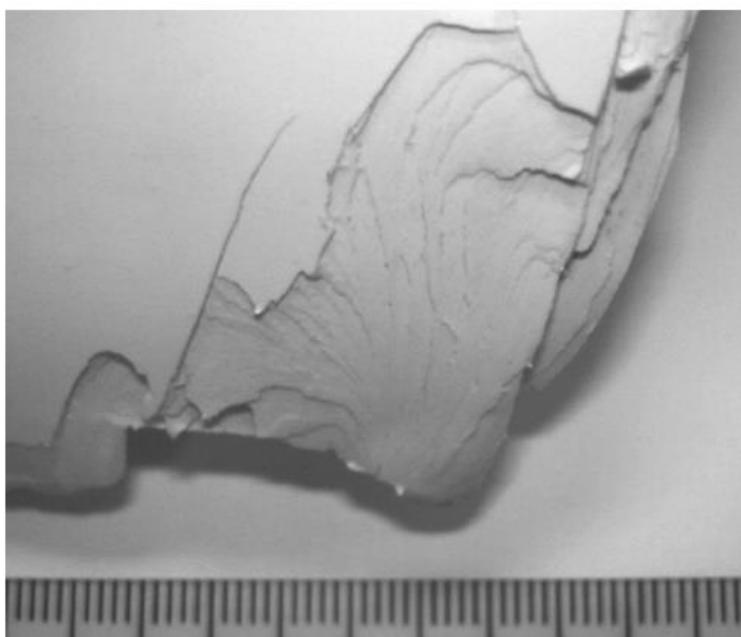
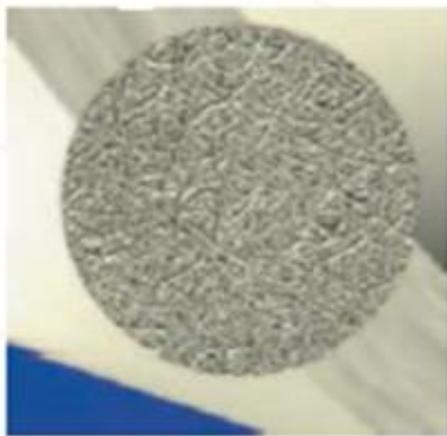


Figura 22. Fotografia de superfície de “Fratura em Camadas” de tubo PVC-O ensaiado em teste hidrostático (Solvay Indupa, 2013).

As estruturas da molécula antes e após a orientação são mostradas na Figura 23.



(a)



(b)

Figura 23. Fotografia das estruturas da molécula antes e após a orientação molecular. (a) Estrutura sem orientação molecular; (b) Estrutura com orientação molecular (Adaptado do Manual Técnico da Linha de tubos BIAX – Mexichem, 2009).

4. DIMENSIONAMENTO, CÁLCULO E PARÂMETROS DE PROJETO DE TUBOS EM PVC

4.1. Os tubos de PVC no Brasil

No Brasil, os tubos de PVC têm particularidades únicas, que os distinguem dos Europeus ou Norte-Americanos, a começar pelas suas características dimensionais. Além disso, não foi estabelecida nas Normas Técnicas Brasileiras uma classificação do material em termos de resistência mínima requerida ao projeto, baseada em modelos matemáticos e estatísticos, podendo ser levantada conforme padrões mundialmente aceitos, da maneira que é tratada nos dias atuais pelos Países Europeus, por meio da Norma ISO 12162, resultando, dessa forma, em diâmetros e espessuras completamente diferentes dos mundiais.

Assim, para os tubos de pressão para condução de água, foi estabelecido no Brasil dois padrões de materiais:

- Os atualmente designados por “PVC 6,3”, ou seja, tubos que podem ser submetidos continuamente, em condições ideais de serviço e temperatura, a tensões circunferenciais admissíveis de 6,3 MPa, com a garantia de resistir no mínimo por cinquenta anos, de cor marrom, destinados à instalação em sistemas prediais de água fria com pressões de serviço de no máximo 750 kPa, à temperatura de 20°C, sendo 500 kPa de pressão estática e 250 kPa de sobre pressão, sendo regulados pela Norma ABNT NBR 5648;
- Os designados por “PVC 12”, conhecidos por “DEFOFO”, ou seja, tubos que podem ser submetidos continuamente, em condições ideais de serviço e temperatura, a tensões circunferenciais admissíveis de 12 MPa, com a garantia de resistir no mínimo por cinquenta anos, de cor azul, com diâmetros externos compatíveis com os tubos em ferro fundido, almejando substituição de um pelo outro, sem necessidade de adaptações, e destinados à execução de adutoras e redes de distribuição em sistemas enterrados de abastecimento de água, com pressões de serviço, incluindo sobre pressões provenientes de variações

dinâmicas, inclusive Golpe de Aríete, de até 1,6 MPa, à temperatura de 25° C, sendo regulados pela Norma ABNT NBR 7665.

Como os compostos são elaborados pelos próprios fabricantes de tubos, sem que se determine sua classificação, não se pode afirmar qual sejam as suas verdadeiras resistências a esforços, podendo ser completamente diferentes de um fabricante para o outro. Assim, também não se conhece inicialmente os fatores de segurança ou dimensionamento a serem empregados.

A comparação se torna mais difícil devido aos ensaios brasileiros não utilizarem os mesmos parâmetros dos ensaios internacionais. Os ensaios dos tubos PVC 6,3 se atêm a ensaios de curta duração, não sendo suficientes para avaliação do desempenho em longo prazo. Isso é potencialmente perigoso dado que os compostos são fortemente dependentes não só da resina básica (a qual a classificação não é conhecida), quanto de seus estabilizantes e cargas (especialmente carbonato de cálcio).

A prática demonstra, não só no Brasil como em outros países, que a pressão interna não é o único fator a ser considerado em uma Tubulação. As cargas externas decorrentes do solo e tráfego, transientes hidráulicos e condições de instalação são extremamente importantes, especialmente em tubos com espessura reduzida.

4.2. Resistência e Performance dos Materiais Plásticos

A resistência é a capacidade do material de suportar as solicitações decorrentes das cargas de tração, compressão, flexão, cisalhamento e torção. A resistência dos tubos de plástico depende de quanto tempo eles estarão sujeitos a uma carga e a uma determinada temperatura. Quanto maior a duração da carga, menor é a resistência. Quanto maior a temperatura, também menor é a resistência. Esta perda de resistência dos materiais plásticos sob carga e temperatura é chamada de *Creep* (PIRES; MOLL, 2004).

A performance do Produto ou Material em plástico depende de quatro elementos:

- Resistência: Falha na máxima Tensão;
- Tenacidade (*Toughness*): Resistência à fratura frágil;
- Ductilidade: Escoamento versus fissuramento, isto é, equilíbrio entre resistência e tenacidade;
- Deformabilidade - Capacidade em absorver deformação.

É importante que se tenha o conhecimento de que quando se projeta um sistema de tubulação pressurizada é necessário estar atento à tensão induzida na parede do tubo devido à pressão de operação interna. Materiais metálicos usados em tubos pressurizados são elásticos, isto é, as relações entre tensão de tração aplicada e consequente deformação são lineares e independem do tempo de duração da carga. No entanto, os materiais plásticos apresentam comportamentos diferentes.

Sua deformação não é proporcional à tensão ou independente do tempo de duração da carga. Materiais plásticos como o PVC ou PE não têm um comportamento elástico. A maioria das equações de projetos que foram derivadas da adoção de comportamento elástico podem ainda ser usadas, desde que os valores de resistência sejam apropriadamente estabelecidos.

O uso de modelos matemáticos que refletem o comportamento elástico do material requer a seleção de valores de resistência que levem em conta as respostas às cargas de longa duração. Para materiais como o PVC, estes valores são determinados em testes de pressão, conduzidos em amostras de tubos feitos do material em avaliação.

4.3. Resistência ao Impacto

A resistência ao impacto pode ser considerada como a Energia necessária para romper um corpo de prova padrão por impacto em um teste padronizado. Este parâmetro de projeto é de suma importância para o Projeto de uma Tubulação, tendo em vista que, dependendo da região ou local onde a mesma deverá ser instalada, esta estará sujeita a maiores agressões, oriundas do transporte, manuseios e assentamento do produto. Portanto, a especificação de produto com maior tenacidade ao impacto se faz necessária, assim como uma maior possibilidade de absorção de energia (MOLL, 2010).

Existem vários mecanismos para se avaliar a resistência de um material ao impacto. O método por queda de percussor metálico determina a energia potencial de impacto que o material pode suportar, sendo calculada pela Equação 1 (NBR 14262, 1999):

$$E_I = mgh \quad (1)$$

Na Equação 1, m é a massa do percussor metálico, expressa em quilogramas, g é a aceleração da gravidade, expressa em metros por segundo ao quadrado e h é a altura de queda do percussor, expressa em metros.

Já a análise de resistência ao impacto por método Izod com entalhe avalia a fratura através da energia necessária para a propagação de uma trinca pré-existente (entalhe).

4.4. Resistência à Pressão Hidrostática Interna

Os organismos internacionais, com o intuito de melhor distinguirem os diversos materiais plásticos, procuram desenvolver critérios de classificação bem abrangentes, envolvendo diversas características dos materiais, tais como densidade, índice de fluidez, resistência à tração e resistência à pressão hidrostática interna. Essas classificações têm como preponderante a determinação da tensão padrão de dimensionamento hidrostático do material, com a qual se permite determinar a resistência à pressão hidrostática do tubo produzido (MOLL, 2010).

O sistema de tubulação (tubos, conexões e juntas), é indicado para o transporte de água bruta, potável ou servida sob pressão e sob temperaturas que não excedam 45°C, especialmente naquelas aplicações onde o desempenho frente às cargas de impacto ou oscilações de pressão é necessário (NBR 15750, 2009).

O principal esforço que age sobre uma tubulação conduzindo água ou esgoto sob pressão, é a pressão hidrostática interna, a qual pode chegar a no máximo 1,6 MPa (NBR 15750, 2009). Desta forma, a pressão hidrostática interna atuante em um tubo, correspondente à tensão circunferencial exigida, empregando-se as dimensões do

diâmetro externo médio e da espessura mínima de parede constantes na especificação do tubo, pode ser calculada através da Equação 2 (NBR 5683, 1999), sendo expresso em Mpa.

$$P_h = \frac{2 \sigma e_n}{d_{en} - e_n} \quad (2)$$

Na Equação 2, σ é a tensão circunferencial induzida na parede do tubo, expressa em MPa, d_{en} e e_n são o diâmetro externo médio e a espessura média de parede do tubo, expressos em milímetros.

4.4.1. Tensões nos Tubos

4.4.1.1. Tensão Circunferencial Induzida

O principal esforço que age sobre uma tubulação conduzindo água ou esgoto sob pressão, é a pressão hidrostática interna, a qual pode chegar a no máximo a 1,6 MPa (NBR 15750, 2009). Ela gera uma tensão circunferencial induzida na parede do tubo, ou simplesmente tensão *hoop stress* máxima, resultante de pressão interna no tubo, que o material suporta sem ruptura, por no mínimo 50 anos, submetido a temperatura de 20°C (DANIELETTO, 2014), conforme mostrado na Figura 24, podendo ser calculada pela Equação 3 (NBR 15750, 2009; NBR 7665, 2007). Este parâmetro também é expresso em MPa.

$$\sigma = \frac{P_h (d_{en} - e_n)}{2 e_n} \quad (3)$$

Na equação 3, P_h é a pressão hidrostática interna aplicada ou pressão de serviço, expressa em MPa, d_{en} e e_n são o diâmetro médio e a espessura média de parede do tubo, expressos em milímetros.



Figura 24. Representação de tensão hidrostática induzida na parede de um tubo (Adaptado do Manual Técnico da Linha de tubos BIAx – Mexichem, 2009).

4.4.1.2. Tensão Limite de Confiança Inferior

Devido à impossibilidade de verificar-se as propriedades de tubos para o tempo de ruptura estimado, introduz-se o conceito de tensão limite de confiança inferior para a resistência hidrostática prevista, σ_{LPL} , (*lower prediction limit*), a qual é expressa em MPa, que representa 97,5 % do limite de confiança inferior da resistência hidrostática, estimada para um par de valores de temperatura e tempo, ou seja, este é o valor de tensão ao qual podemos prever com 97,5 % de certeza que o tubo não sofrerá ruptura.

4.4.1.3. Tensão de Projeto

A tensão de projeto é baseada no valor de σ_{LPL} . (ISO 9080, 2012). Este valor de σ_{LPL} pode ser convertido em valores de *minimum required strength*, ou Resistência Mínima Requerida (MRS), ou seja, a tensão circunferencial admitida para cinquenta anos (ISO 12162, 2009).

Dessa forma, é possível obter a Tensão de Projeto do tubo (σ_S), admitindo os dados padrões de pressão nominal do sistema (pressão relacionada às características mecânicas dos componentes do sistema de tubulações e empregada para classificação do tubo e demais componentes do sistema) e diâmetro externo nominal, para qualquer classe de diâmetro nominal adotado, de acordo com as Normas NBR 15750 (2009) e NBR 7665 (2007), utilizando a Equação 4.

$$\sigma_s = \frac{P_n (d_{en} - e_n)}{2 e_n} \quad (4)$$

Na Equação 4, P_n é a pressão nominal do sistema, expressa em MPa.

4.4.1.4. Tensão Admissível do Material

A resistência dos plásticos varia com o tempo, e em consequência, sua vida útil varia inversamente com o esforço a que foi submetido (DANIELETTO, 2014). As normas ISO recomendam para tubos de água sob pressão uma vida útil de 50 anos. Surge, então, a questão de se determinar a tensão admissível do projeto. Mas, se a resistência do material varia com o tempo e se recomenda uma vida útil de 50 anos, alguma forma de extrapolação deve ser feita. O processamento do material pode alterar suas características e um processamento mal executado pode resultar em um tubo com desempenho inferior ao esperado para aquele material, vindo a apresentar falhas em um tempo menor que aquele para o qual foi dimensionado. Este método de extrapolação visa estabelecer, para cada material, uma tensão hidrostática de longa duração para o dimensionamento de tubos, servindo como referência para os testes de pressão executados em amostras extraídas da produção ou encontradas no mercado, comparando-se os tempos de ruptura das amostras ensaiadas, a certa pressão e temperatura, com os fornecidos pelas curvas resultantes do método de extrapolação.

Para que o tubo trabalhe adequadamente, a tensão circunferencial atuando em sua parede não deverá exceder a resistência do material, ou seja, a sua tensão admissível.

4.4.1.5. Curvas de Regressão, Resistência Mínima Requerida e Tensão Hidrostática de Longo Prazo

As Normas para tubos plásticos baseiam-se nas curvas de regressão para estabelecerem as pressões, temperaturas e tempos de ensaios (DANIELETTO, 2014). Deve-se tomar muito cuidado ao analisar um material desconhecido pelos testes de pressão de curta duração (*short term strength*), pois alguns materiais possuem ótimo desempenho nestes testes, e baixo desempenho à longa duração.

É recomendável que, ao optar-se por um determinado material, seu desempenho seja analisado, também, com testes de pressão prolongados (100, 165 e 1.000 horas), pois somente confirma-se que o material comporta-se como especificado e que os testes mais rápidos tornam-se válidos. Já os testes de longa duração a 10.000 horas têm como objetivo a extrapolação e/ou confirmação deste comportamento, não sendo aplicados na avaliação de produção.

Os ensaios a 20°C procuram observar a ruptura do tipo dúctil (tensão elevada a tempo curto), mas influenciável pela densidade do material, sendo mais alta a resistência a este tipo de ruptura quando maior for a densidade. Já os ensaios a temperaturas elevadas buscam avaliar a ocorrência de ruptura do tipo frágil (*stress cracking*) mais influenciável pelo peso molecular e a sua distribuição, sendo mais resistente ao *stress cracking* quanto maior for o peso molecular (DANIELETTO, 2014). O terceiro estágio, da degradação química do material, que resulta também em ruptura frágil, observa-se a tensões mais baixas, temperaturas mais elevadas e tempos muito longos. Vale mencionar que há uma influência importante do meio em que os testes são efetuados. Sendo que os corpos-de-prova apresentam maior tempo de ruptura, isto é, suportam mais, quando o fluido interno e externo ao corpo-de-prova é ar, seguido de água. O menor tempo ocorre quando temos água internamente e ar externamente.

Para estabelecer a tensão admissível (σ_{adm}), a qual estabelece a classificação dos materiais termoplásticos em forma de tubo, é introduzido, de acordo com a Norma ISO 12162 (2009), o conceito de resistência mínima requerida MRS (*minimum required strength*), considerada como uma propriedade do material, a qual representa o valor de σ_{LPL} , da curva obtida pelo resultado do ensaio de pressão hidrostática interna, extrapolado para 50 anos, admitindo a condução de água a 20°C, também conhecida como tensão hidrostática de longo prazo, σ_{LTHS} , (*long term hydrostatic stress*). Todas estas tensões também são expressas em MPa.

Para estimar esta resistência hidrostática de longo prazo de Tubos de material plástico, deve-se utilizar um método por extrapolação estatística, listado na Norma ISO 9080 (2012). Esta resistência hidrostática estimada é obtida através do ajuste de uma reta em uma curva de regressão, representada por um gráfico “*log x log*” de tensão e tempo, conforme mostrado na Figura 25.

Esta reta é obtida à temperatura de 20 °C, através da aplicação de diferentes níveis ou valores de tensão de ruptura, através de pressão interna, obtendo-se diversos pontos de ruptura ao longo de tempos previamente estabelecidos, até 10.000 horas (1,14 anos). Com os valores de tensão e tempo de ruptura obtidos, utiliza-se o método dos mínimos quadrados, no âmbito do Cálculo Numérico, para estabelecer-se uma equação de reta interpolada do logaritmo do tempo de ruptura em função da tensão, sendo extrapolada até 50 anos, por meio de uma Equação conforme listado abaixo (MOLL, 2010):

$$\log(t) = C_1 + \frac{C_2}{T} + C_3 \log(\sigma) + C_4 \log \frac{(\sigma)}{T} \quad (5)$$

Na Equação 5, t é o tempo de falha do material, expresso em horas, σ é a tensão aplicada no Ensaio, expressa em MPa, T é a temperatura, expressa em kelvin e as constantes C_1 a C_4 são os coeficientes de regressão para cada tipo de produto ensaiado, os quais podem variar de acordo com o tipo de material empregado, assim como suas dimensões e processo de fabricação utilizados.

De acordo com o Apêndice A (Análise de regressão em uma tubulação de PVC-O DN100 Amanco Brasil), são apresentados na Tabela 1 os valores dos coeficientes de regressão, para os tubos de diâmetro nominal 100, com e sem orientação molecular, fabricados pela Amanco Brasil:

Tabela 1. Coeficientes de regressão linear para os tubos DN 100 com e sem orientação molecular, fabricados pela Amanco Brasil.

Coeficiente	Valores PVC-O	Valores PVC-U
C_1	-128,866	-164,461
C_2	57.532,453	60.126,534
C_3	44,126	75,079
C_4	-23.714,332	-29.349,493

Os plásticos, por serem materiais viscoelásticos, apresentam resistência significativamente maior quando submetidos à carga de curto prazo, como pode ser visto na curva de regressão apresentada na Figura 25 (Mexichem, 2009).

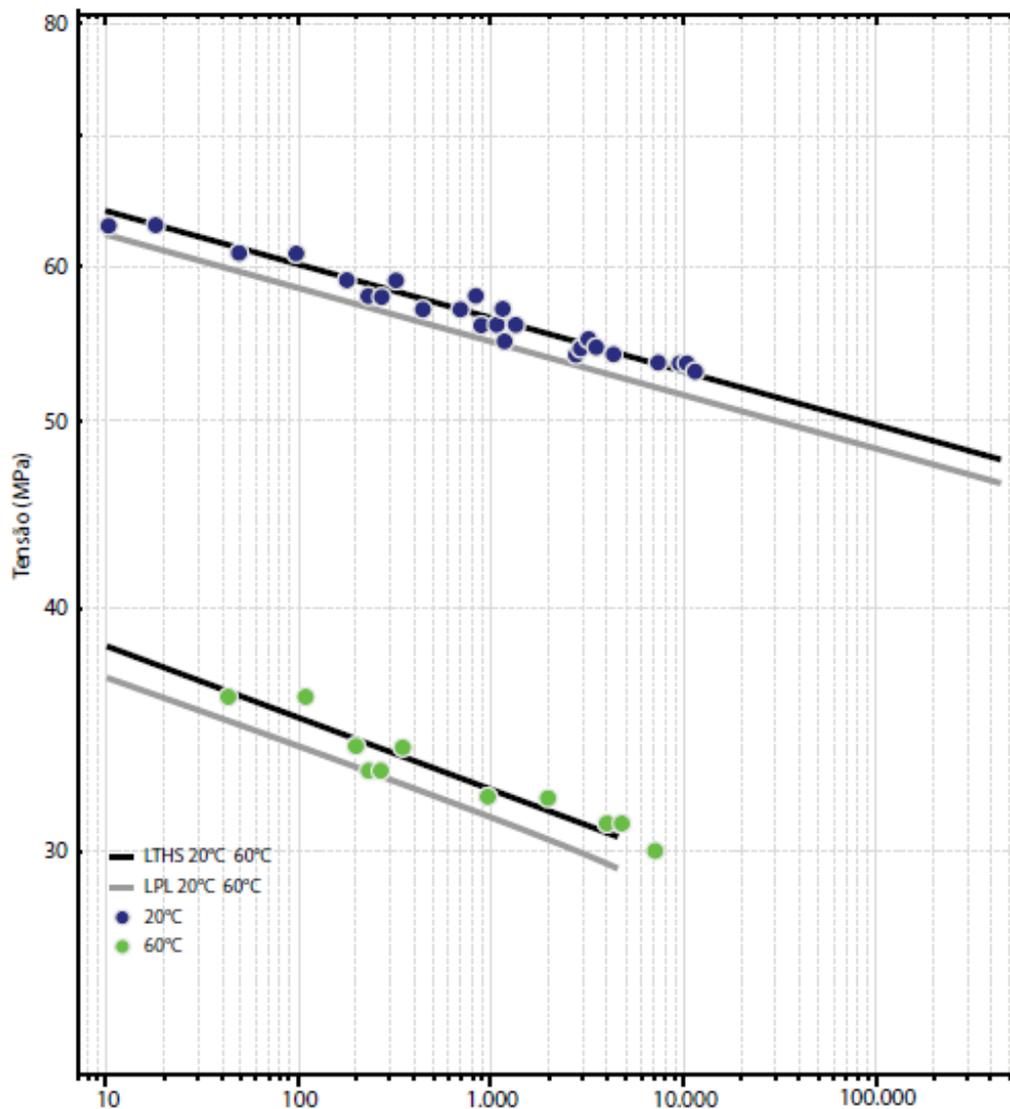


Figura 25. Curva de regressão para determinação de resistência hidrostática a longo prazo de tubo PVC-O DN 100 fabricado pela Amanco Brasil (Adaptado do Manual Técnico da Linha de tubos BIAX – Mexichem, 2009).

Deve-se observar que, sendo a curva de regressão um gráfico cujas linhas têm pequenas inclinações, significa que uma leve diminuição no valor da tensão resultará em um aumento no tempo de ruptura estimado.

4.4.2. Coeficiente de Segurança de Projeto ou Serviço

O coeficiente de segurança de projeto ou serviço (C) pode ser descrito como o coeficiente total, com um valor maior do que a unidade, o qual leva em consideração as condições de serviço, assim como as propriedades dos componentes do sistema de

tubulação não previstas em σ_{LPL} , cobrindo os efeitos do manuseio, riscos, variação do material (tempo), etc.

Para materiais elásticos tradicionais, os coeficientes de segurança de projeto podem ser definidos como relacionados à máxima tensão ou carga permitida. Os valores, no entanto, são válidos para as condições iniciais. Para materiais elásticos tradicionais, é considerado que as condições iniciais não se alteram no curso do tempo e consequentemente independente deste. Para tubos termoplásticos, os fatores de segurança são definidos em relação ao tempo (MOLL, 2010).

Conforme as Normas NBR 15750 (2009) e NBR 7665 (2007), a MRS, desta forma, também é um dado utilizado na determinação da tensão circunferencial admissível de projeto do material, por meio da seguinte Equação 6.

$$\sigma_s = \frac{MRS}{C} \quad (6)$$

Na equação 6, C é o coeficiente total de projeto ou serviço adotado, o qual deve ser maior ou igual a 1,6 para o PVC-O (NBR 15750, 2009), e igual a 2,0, para o PVC-U (NBR 7665, 2007). Ainda, da mesma forma, é dimensionado o MRS, para cada tipo de tubo, de acordo com a Equação 7 (NBR 15750, 2009; NBR 7665, 2007):

$$MRS = \sigma_s C \quad (7)$$

4.4.3. Classificação e Dimensionamento de Tubos

No Brasil, tem-se utilizado as classificações e métodos europeus de dimensionamento, principalmente os estabelecidos pelas normas ISO, as Alemãs DIN, e agora as EN (Normas da Comunidade Europeia). Anteriormente, ao invés de se classificar os materiais pelas suas tensões hidrostáticas de longa duração, os materiais eram classificados em função das tensões de dimensionamento máximo estabelecidas nas normas de aplicação de cada tipo de tubo ou conexão. Desta maneira, materiais de desempenho bastante diferentes resultavam em tubos igualmente dimensionados, pois adotavam-se as mesmas tensões para seus dimensionamentos. Ou seja, coeficiente de

segurança de projeto ou serviço era diferente em cada caso, sem que o usuário, muitas vezes, desse por conta (DANIELETTO, 2007).

Os tubos de PVC, no Brasil, também alteraram sua classificação, entretanto o fizeram seguindo o conceito antigo, onde a mesma é dada pela tensão de dimensionamento e não pelo MRS. A partir da plotagem da curva de regressão linear, é possível obter os valores listados para a tensão limite de confiança inferior para a resistência hidrostática prevista e Resistência Mínima Requerida.

4.5. Grau de Gelificação e Resistência ao Cloreto de Metileno

As resinas de PVC sofrem um processo de gelificação e fusão quando aquecidas durante seu processamento ou sua transformação em produto, através de extrusão, calandragem, moldagem por injeção, etc. Esta resina apresenta algumas peculiaridades que tornam seu mecanismo de fusão ou de plastificação diferente da maioria dos termoplásticos.

Antes de ocorrer à fusão completa da resina de PVC durante seu processamento, uma etapa conhecida como gelificação acontece, e é fundamental para que a resina de PVC torne-se uma massa fundida e processável (MOGHRI, 2003). O processo de gelificação deve ser descrito como uma desintegração de vários níveis morfológicos através da combinação de temperatura, pressão e tensão local acompanhado pelo desenvolvimento de um fundido mais ou menos homogêneo e com o resfriamento o desenvolvimento de uma cristalização secundária.

Para o PVC, orientado ou não, ter bom desempenho mecânico é importante considerar o “nível de gelificação” do produto (FILLOT, 2003), que corresponde à eficiência da conversão do composto em pó a uma rede tridimensional polimérica, com a compactação, eliminação dos vazios e poros das partículas, e contornos inter-partícula, simultaneamente à alteração da estrutura cristalina do polímero, sob ação de temperatura, cisalhamento e pressão (MANRICH, 2005; CANEVAROLO, 2004).

Geralmente, propriedades relacionadas com resistência como tensão máxima e alongação na ruptura aumentam com o grau de gelificação até atingir um valor máximo

(MARQUES, 2006), ou seja, existe um valor ótimo para certo grau de gelificação. Porém, se o grau de gelificação do composto de PVC é baixo, as tensões aplicadas podem ser suficientes para separar as partículas primárias, uma vez que a ligação entre as mesmas é fraca, fazendo com que o material sofra fratura com facilidade apresentando baixa resistência ao impacto.

No grau de gelificação ótimo, as partículas primárias remanescentes do processo de gelificação e fusão apresentam o máximo grau de coesão, com forças de ligação extremamente fortes, persistindo na estrutura interna do composto os pequenos vazios estruturais que atuam como aliviadores, porém neste caso as forças de ligação são capazes de resistir à tensão aplicada, elevando a resistência ao impacto para níveis mais elevados.

A homogeneidade das propriedades mecânicas e suas variações ao longo do comprimento de produtos extrudados de PVC dependem da homogeneidade da gelificação que pode ser avaliada através do Ensaio de resistência ao cloreto de metileno. O Ensaio consiste em imergir uma amostra de produto final de PVC rígido no cloreto de metileno e este tende a atacar quimicamente a amostra.

Dependendo da temperatura de processamento, os produtos de PVC apresentam vários níveis de resistência ao cloreto de metileno. Se o grau de gelificação do composto de PVC for elevado, sua resistência ao cloreto de metileno também será alta, sofrendo apenas um inflamento uniforme. Porém, se o composto de PVC apresentar um reduzido grau de gelificação, a imersão deste composto no cloreto de metileno provoca a separação das partículas primárias que estão apenas parcialmente sinterizadas, sendo, portanto fortemente atacado e apresentando baixa resistência química a este solvente (RODOLFO JR, 2006).

O aquecimento não homogêneo do polímero, bem como o transporte não estável do polímero fundido nos canais da rosca e na matriz da extrusora pode originar instabilidades no processo de extrusão e estas instabilidades podem gerar variações locais no grau de gelificação. O grau de gelificação na camada central, ao longo da espessura, do tubo de PVC deve ser de 4 a 10% menor que em camadas mais externas

do tubo. O Ensaio de resistência ao cloreto de metileno traz resultados satisfatórios para graus de gelificação entre 45 e 50% (PISZCZEK, 2003).

Segundo ALVES (2006), não é necessário atingir o máximo grau de gelificação para que o material processado atinja os máximos valores de propriedades. Para uma formulação típica, um desempenho ótimo pode ser obtido com graus de gelificação entre 60 e 70%. Para FILLOT (2003), os valores ótimos de gelificação encontram-se na ordem de 50 a 70% para um bom compromisso entre tenacidade e limite de resistência à tração.

Para os tubos com orientação molecular, um nível elevado de vazios e contornos de grão existentes na pré-forma, oriundo de um baixo nível de gelificação, poderia levar a queda na eficiência da orientação, já que parte da deformação do corpo durante o estiramento resultaria do deslocamento entre grãos, cuja interface tem baixa adesão, absorvendo a deformação imposta pelo mecanismo de orientação, sem o alinhamento das macromoléculas. Ainda, esses vazios podem ser aumentados durante o processo de orientação, concentrando tensões nesses pontos da matriz dúctil, podendo levar à falha precoce da peça pronta.

Se a matriz é bem gelificada no processo de conformação da pré-forma, grande parte da energia gasta no estiramento será consumida na deformação das cadeias, enquanto o deslizamento entre grãos e alongamento de vazios será pouco significativo.

A eficiência do processo de orientação assim como confirmação do nível de gelificação adequado podem também ser avaliados colocando-se os orientados em estufa (entre 100 e 150°C). A recuperação após longo tempo em temperatura acima da temperatura de transição vítrea (T_g) (temperatura acima da qual as cadeias moleculares da fase amorfa adquirem mobilidade, podendo ser orientadas) (NBR 15750, 2009), deve resultar num perfil dimensionalmente muito similar à pré-forma. Se a fração recuperada não equivale à razão de estiramento ou grau de orientação molecular, alguns fatores devem ser levantados. Entre eles:

- A temperatura de estiramento ou orientação molecular é elevada demais e as cadeias recuperam rapidamente a deformação imposta pelo estiramento,

retornando ao estado desorientado (devido ao baixo tempo de relaxação molecular);

- Pelo mesmo motivo anterior, a velocidade de estiramento ou orientação molecular ou a taxa de resfriamento são muito baixas;
- O nível de gelificação do perfil é insuficiente.

4.6. Resistência à Compressão Diametral

4.6.1. Colapso devido ao Vácuo Interno ou Pressão Externa

Designa-se por colapso a deformação em forma achatada da seção transversal do tubo, conforme mostrado na Figura 26.

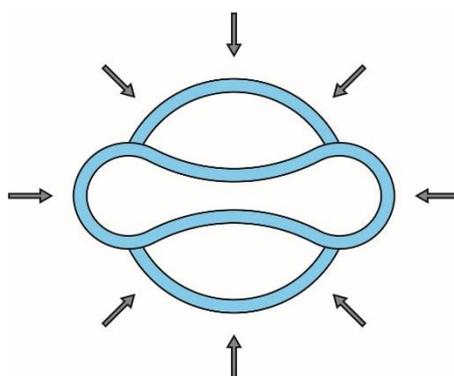


Figura 26. Desenho esquemático de colapso sofrido por um tubo (Danieletto, 2007).

Tubos assentados sob a água ou em solo saturado, sujeitos a uma pressão externa maior do que a pressão interna devem ser projetados para resistir ao colapso. O mesmo se aplica aos tubos sujeitos a subpressão, seja oriunda de uma bomba de sucção (vácuo), ou de transientes hidráulicos (DANIELETTO, 2014). Uma tubulação poderá estar sujeita ao colapso sob vácuo interno ou pressão externa, ou ambos simultaneamente (THIMOSHENKO, 1973). Este fenômeno é mostrado na Figura 27.

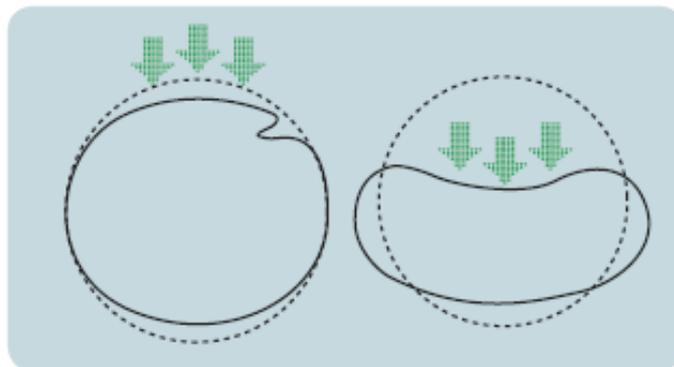


Figura 27. Tubulação sujeita ao colapso, sob vácuo interno ou pressão externa (Adaptado do Manual Técnico da Linha de tubos BIAX – Mexichem, 2009).

De acordo com THIMOSHENKO (1973), a pressão crítica, expressa em MPa, em que o colapso é iminente, de uma tubulação sem apoio externo (quando há apenas pressão hidrostática), como por exemplo, no caso de tubulações não enterradas, sujeitas a vácuo interno ou travessia subaquática, é dada pela Equação 8.

$$P_{cri} = \frac{2 \times E}{\left[(1 - \rho)^2 \times \left(\frac{d_{en}}{e_n} - 1 \right) \times 3 \right]} \quad (8)$$

Na Equação 8, E é o módulo de elasticidade do tubo, expresso em MPa e ρ é o coeficiente de Poisson do material do tubo. Segundo (THIMOSHENKO, 1973), o valor do módulo de elasticidade do tubo dependerá do intervalo de tempo durante o qual a pressão externa (ou vácuo interno) age.

Na Equação 8, é levado em consideração o perfil de uma tubulação como sendo perfeitamente cilíndrica. Para tubulações com certa ovalização, a pressão crítica de colapso será menor, sendo necessário o uso de coeficientes de correção. A deformação diametral de um tubo ovalizado é mostrada na Figura 28.

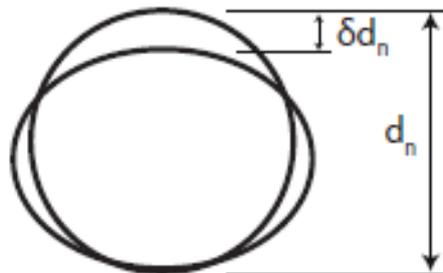


Figura 28. Deformação diametral de um tubo ovalizado (Adaptado do Manual Técnico da Linha de tubos BIAx – Mexichem, 2009).

No caso da Equação 9, tais coeficientes de correção foram desenvolvidos por THIMOSHENKO (1973). Estes valores são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Coeficientes de correção da pressão de colapso para tubos ovalizados (Adaptado do Manual Técnico da Linha de tubos BIAx – Mexichem, 2009).

Deformação diametral relativa	
$\frac{\delta d_{en}}{e_n}$ (%)	C_δ
1	0,924
2	0,859
3	0,803
4	0,755
5	0,712
6	0,674
7	0,639
8	0,609
9	0,581
10	0,555

Desta forma, a pressão crítica de colapso para tubulação ovalizada, sem apoio externo, pode ser calculada por meio da Equação 9 (THIMOSHENKO, 1973).

$$P_{crio} = C_\delta \times P_{cri} \quad (9)$$

Na Equação 9, C_δ é o coeficiente de correção da pressão crítica de colapso, aplicável a tubos ovalizados, sem apoio externo.

4.7. Estabilidade Dimensional

As tensões residuais, tanto longitudinais quanto radiais, provocam uma perda de estabilidade dimensional dos tubos. A determinação da estabilidade dimensional visa avaliar estas tensões (DANIELETTO, 2014). Os métodos utilizados para esta determinação variam ligeiramente de Norma para Norma, porém normalmente seguem os mesmos princípios, ligados ao conceito de *Creep* (PIRES; MOLL, 2004), a qual está relacionada à estabilidade dimensional do material sob carga. Em materiais plásticos esta estabilidade dimensional é importante e o tubo deve ser capaz de resistir a modestas cargas de tração por longos períodos de tempo sem qualquer mudança significativa nas dimensões ou forma. *Creep* é, portanto, um fator importante a ser considerado quando se avalia a pressão de trabalho e seu efeito na vida útil do tubo.

4.8. Resistência ao Achatamento e Classe de Rigidez

Rigidez é a capacidade de um tubo plástico de resistir a cargas externas como vácuo, pressão externa de água, pressão do reaterro (PIRES; MOLL, 2004). A rigidez de um tubo plástico é proporcional à inércia *versus* módulo de elasticidade. Como o módulo de elasticidade dos materiais plásticos é baixo, a rigidez também apresenta valores menores que os materiais tradicionais. Como exemplo, pode ser dito que o módulo de elasticidade do PVC, o qual é da ordem de três mil MPa, enquanto o módulo do aço é da ordem de duzentos mil MPa. O módulo elástico de compressão pode ser descrito como a razão entre a mudança na pressão externa e a mudança parcial de volume, em condições reversíveis. Já a classe de rigidez (CR) (NBR 9053, 1999), expressa em pascal, é dada pela Equação 10:

$$CR = \frac{E \left(\frac{I}{L} \right)}{D_m^3} \quad (10)$$

Na Equação 10, E é o módulo de elasticidade do material, expresso em Pa, (I/L) é a relação do momento de inércia da seção transversal da parede do tubo por unidade de comprimento, expressa em metros elevados à terceira potência, e D_m é o diâmetro médio do corpo-de-prova, expresso em metros.

Na impossibilidade da obtenção dos valores de módulo elástico de compressão e momento de inércia da seção transversal da parede do tubo, a classe de rigidez pode ser calculada também por meio da Equação 11 (NBR 9053, 1999):

$$CR = 0,0186 \frac{\left(\frac{F}{L}\right)}{\Delta V} \quad (11)$$

Na Equação 11, F é a carga aplicada, expressa em Newtons, ΔV é a deflexão vertical, expressa em metros, e a relação $(F/L) / \Delta V$ é o coeficiente angular da reta obtida a partir do ensaio de compressão do material, expresso em Pascal.

4.9. Resistência ao Prolongamento de Fissura

Durante o transporte e manuseio dos tubos, poderá ocorrer impacto, bem como poderão ocorrer cargas pontuais devido ao assentamento dos tubos na vala. Além disso, ocorrem normalmente sobre pressões devido à operação das estações de bombeamento, válvulas e registros do sistema, além de cargas cíclicas, devido às partidas frequentes das bombas. Tais condições exigem tubos com alta robustez, ou seja, resistência à pressão interna, alta resistência ao impacto e alta tenacidade. Tais situações ocorrem em varias aplicações, como por exemplo, em irrigação e em bombeamento de esgoto.

As variações lentas de pressão que ocorrem normalmente ao longo do dia nas redes de distribuição de água, não precisam ser consideradas. O número de ciclos que uma tubulação pode resistir sob a ação de uma pressão variável depende muito mais da variação da pressão (diferença entre a pressão máxima e a pressão mínima) do que do valor médio da pressão atuante.

A resistência à propagação da fratura de um material é uma medida de sua capacidade em resistir à propagação da fissura. Em adição a necessidade de resistência, rigidez e deformabilidade dos tubos plásticos, uma característica importante é a tenacidade, (*toughness*) que aumenta a resistência do material à propagação rápida da fissura. Isto é particularmente importante no caso do PVC-U, *Unplasticized Polyvinylchloride* ou PVC não-plastificado, que no Brasil é conhecido por PVC rígido, o

qual pode apresentar ruptura do tipo frágil seguindo a propagação rápida da fissura na parede do tubo, principalmente quando não for bem processado e bem assentado.

A falha frágil é caracterizada por trincas que iniciam e avançam lentamente através de um longo período de tempo. Quando ocasionada pelas cargas de reaterro (cargas pontuais) a trinca avança pela parede e em seguida na direção axial. Se o material possui característica de baixa propagação de fratura, os lábios de cisalhamento irão impedir a propagação desta. Já a ruptura dúctil ocorre quando o tubo está submetido a uma sobrepressão contínua e consiste em um aumento diametral do mesmo que eventualmente tomará a forma de um balão e, após, sofrerá a ruptura.

A propriedade que em tubos de plástico é conhecida como “*Fracture Toughness*” é a capacidade do material plástico de resistir à propagação da fratura (PIRES; MOLL, 2004). Na indústria de infraestrutura ligada à adução de água e ao saneamento, é inevitável que os tubos assentados estejam com sobrecargas, arranhados ou com riscos na superfície que atuam como tensões concentradas.

Portanto, a característica requerida é de alta resistência à propagação da fratura ou que o material apresente escoamento e plasticidade para deformar e resistir ao fissuramento (rachadura).

Nas extremidades das trincas a concentração de tensão leva o material a escoar. Quanto menor a tensão de escoamento maior a zona plástica. É sempre vantajoso ter um material com uma tensão de escoamento baixa, o que permitirá gerar plasticidade em um nível de alongação inferior. As zonas plásticas absorvem energia e geralmente previnem a propagação lenta da fratura. Estas zonas também são responsáveis por transformar as trincas com formato agudo em abauladas, anulando, portanto, a concentração de tensão.

O Ensaio de propagação da fratura foi desenvolvido no sentido de medir o processo de crescimento lento da fissura, ou seja, quando do aparecimento do “craze” (PIRES; MOLL, 2004) e também obter melhor avaliação da qualidade da formulação e do processamento, uma vez que muitas das falhas dos tubos em serviço são iniciadas

pela má instalação, o que possibilita o aparecimento de uma tensão localizada. O exemplo que pode ser citado é o de uma pedra pontiaguda.

Este Ensaio de Anel “C” do anel envolve a preparação do corte de um anel do tubo no qual é feito um entalhe pontiagudo, com uma profundidade especificada e com aplicação de uma tensão pré-calculada para um tempo específico. A carga será aplicada a fim de que seja iniciada a propagação da fissura. O modo como a fissura se propaga e seu comportamento é investigado, para sinalizar a demonstração de ductilidade.

4.10. Grau de Orientação Molecular

Assim como outros polímeros, o PVC pode ter as propriedades mecânicas melhoradas quando se orientam as cadeias moleculares no sentido da solitação. Orientar um polímero significa alinhar suas cadeias macromoleculares numa direção ou plano determinado, ao invés de deixá-las desordenadas e emaranhadas umas nas outras (MANRICH, 2005).

Nos polímeros semicristalinos a manutenção da deformação de uma peça, acima da temperatura de transição vítrea, até os níveis desejados é feita pelo ancoramento ou entrelaçamento dos cristalitos, ligados por cadeias da fase amorfa. Em polímeros onde a cristalização é discreta, ou seja, onde o grau de orientação molecular é relativamente baixo, como no PVC, a deformação em altos percentuais é garantida principalmente pela viscosidade elongacional, nesse caso, função do peso e distribuição do peso molecular do polímero e da temperatura (GILBERT; HITT, 1992).

Para cada material analisado, são calculados dois Graus de Orientação Molecular: O Axial (λ_a) e o Circunferencial (λ_c), por meio das Equações 12 e 13, respectivamente (NBR 15750, 2009):

$$\lambda_a = \frac{L_i}{L_f} \quad (12)$$

$$\lambda_c = \frac{(D_i - e_i)}{(D_f - e_f)} \quad (13)$$

Na Equação 12, L_i é a média aritmética da distância entre as marcas circulares traçadas nos corpos de prova, por meio de um gabarito, antes do ensaio, em pontos de referência, sendo expressa em milímetros (mm) e L_f é a média aritmética da distância entre as marcas circulares traçadas nos corpos de prova, depois do ensaio, também expressa em milímetros (mm). Já na Equação 13, D_i e e_i são as médias aritméticas dos diâmetros e das espessuras medidas em marcas circulares traçadas antes do ensaio, tomadas em quatro geratrizes equidistantes entre si, expressas em milímetros (mm) e D_f e e_f são as médias aritméticas dos diâmetros e das espessuras medidas em marcas circulares traçadas depois do ensaio, também tomadas em quatro geratrizes equidistantes entre si e também expressas em milímetros (mm).

Quanto maior é a razão de estiramento, ou seja, a relação entre dimensão no eixo de estiramento do orientado e dimensão da pré-forma, maior o nível de orientação a uma mesma temperatura.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os materiais, procedimentos e os métodos de ensaios utilizados para a obtenção dos resultados da pesquisa.

5.1. Materiais

Para desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dados resultantes de ensaios mecânicos, de performance e de controle de qualidade, realizados em corpos de prova extraídos a partir de tubos fabricados na Unidade da Mexichem Brasil Indústria de Transformação Plástica, localizada na cidade de Sumaré/SP, conforme especificações técnicas listadas na Tabela 3.

Tabela 3. Materiais utilizados no desenvolvimento da Pesquisa.

Tipo do Tubo	Nomenclatura Técnica	Diâmetro	
		Nominal (mm)	Norma de Referência
Com Orientação Molecular	Biax Adução Jeri	100	ABNT NBR 15750
Sem Orientação Molecular	Ductilfort Jeri DEFOFO	100	ABNT NBR 7665

Os materiais foram selecionados de forma aleatória nas linhas de fabricação de tubos por extrusão, sendo estas amostras identificadas e rastreabilizados, para a posterior confecção de corpos de prova, de acordo com seus respectivos lotes, datas e horas de fabricação, conforme mostrado na Tabela 4 e nas Figuras 29 e 30.

Tabela 4. Dados das Amostras coletadas das linhas de produção para confecção de Corpos de Prova.

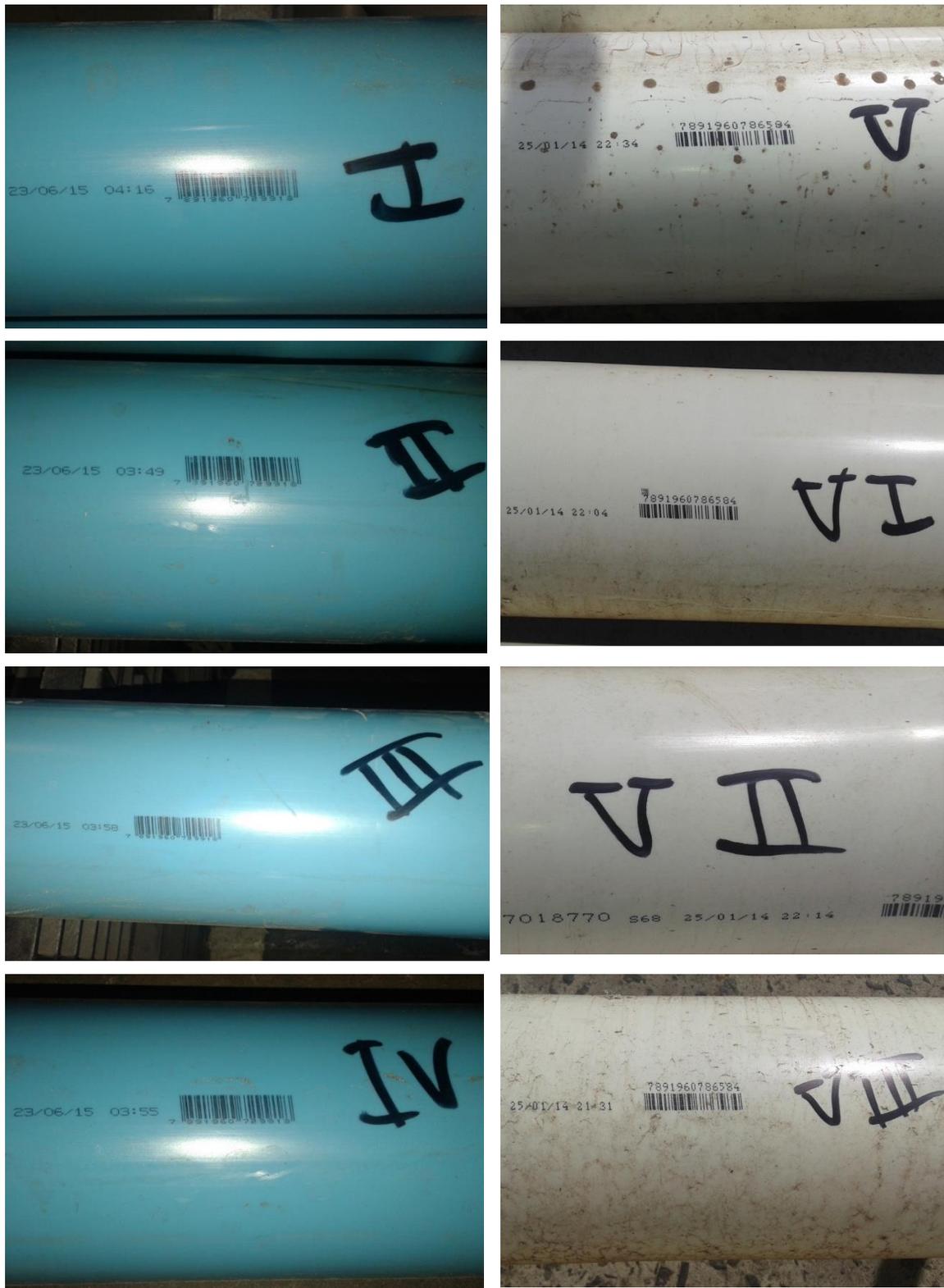
Amostras de Tubos sem Orientação Molecular				Amostras de Tubos com Orientação Molecular			
Nº Amostra	Número do Lote	Data Fabricação	Horário	Nº Amostra	Número do Lote	Data Fabricação	Horário
01	7891960723918	23/06/2015	04:16	05	7891960786584	25/01/2014	22:34
02	7891960723918	23/06/2015	03:49	06	7891960786584	25/01/2014	22:04
03	7891960723918	23/06/2015	03:58	07	7891960786584	25/01/2014	22:14
04	7891960723918	23/06/2015	03:55	08	7891960786584	25/01/2014	21:31



(a)

(b)

Figura 29. Tubos selecionados por amostragem aleatória para confecção de corpos de prova: (a) Tubos Ductilfort Jeri DEFOFO sem orientação molecular; (b) Tubos Biax Adução Jeri com orientação molecular (Mexichem, 2015).



(a)

(b)

Figura 30. Identificação e rastreabilização dos Tubos: (a) Tubos Ductilfort Jeri DEFOFO sem orientação molecular; (b) Tubos Biax Adução Jeri com orientação molecular (Mexichem, 2015).

Posteriormente, as amostras foram seccionadas na Cortadora Modelo CL200ED, projetada pelos próprios Técnicos da Unidade Fabril, sendo confeccionados corpos de prova com identificações e medidas de comprimento específicas, de acordo com a aplicação em cada ensaio, conforme mostrado na Figura 31.



Figura 31. Confeção e identificação dos corpos de prova: (a) Corte das amostras e confecção dos corpos de prova; (b) Separação e identificação dos corpos de prova (Mexichem, 2015).

As medidas padrão de comprimento para cada corpo de prova, assim como as respectivas identificações e correlações com os Ensaio realizados, estão relacionadas na Tabela 5.

Tabela 5. Dados das Amostras coletadas das linhas de produção para confecção de Corpos de Prova.

Amostra	Nº do Ensaio	Nome do Ensaio	Quantidades de Corpos de Prova		Identificação dos Corpos de Prova		L _m CP (mm)
			PVC-U	PVC-O	PVC-U	PVC-O	
1	1	Resistência ao Impacto (Percursor Metálico)	4	4	1.1	5.1	208
					2.1	6.1	
					3.1	7.1	
					4.1	8.1	
2	2	Resistência à pressão hidrostática (curta duração)	2	2	1.2	5.2	520
					2.2	6.2	
					3.2	7.2	
3	3	Resistência ao cloreto de metileno	4	4	1.3	5.3	310
					2.3	6.3	
					3.3	7.3	
					4.3	8.3	
4	4	Compressão diametral	4	4	1.4	5.4	320
					2.4	6.4	
					3.4	7.4	
					4.4	8.4	
5	5	Verificação de estabilidade dimensional	4	4	1.5	5.5	310
					2.5	6.5	
					3.5	7.5	
					4.5	8.5	
6	6	Determinação da rigidez	4	4	1.6	5.6	320
					2.6	6.6	
					3.6	7.6	
					4.6	8.6	
7	7	Resistência do anel C (Resistência à Fissura)	4	4	1.7	5.7	260
					2.7	6.7	
					3.7	7.7	
					4.7	8.7	
8	8	Determinação do grau de orientação Molecular	-	4	-	5.8	320
					-	6.8	
					-	7.8	
					-	8.8	
1	9	Resistência ao Impacto (Pêndulo de Charpy)	4	4	1.9	5.9	50,80
					2.9	6.9	
					3.9	7.9	
					4.9	8.9	

5.2. Métodos

Após o corte das amostras, preparação inicial e identificação dos corpos de provas, estes foram separados de acordo com cada Ensaio realizado, juntamente a seus respectivos Equipamentos, Sistemas e Instrumentos específicos.

5.2.1. Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Percursor Metálico

O objetivo deste Ensaio é verificar a resistência ao impacto de tubos em PVC, com e sem orientação molecular, pela queda livre de uma altura determinada de um percursor metálico de massa e dimensões conhecidas.

5.2.1.1. Normas de referência e documentos complementares

- ABNT NBR 7665:2007 – Sistemas para adução e distribuição de água – Tubos de PVC 12 DEFOFO com junta elástica – Requisitos.
- ABNT NBR 15750:2009 – Tubulações de PVC-O (cloreto de polivinila não plastificado orientado) para sistemas de transporte de água ou esgoto sob pressão – Requisitos e métodos de ensaios.
- ABNT NBR 14262:1999 – Tubos de PVC – Verificação da resistência ao impacto.
- Instrução de Trabalho Mexichem ITR 0529 – Resistência ao Impacto – Tubos.

5.2.1.2. Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução do ensaio está listada na Tabela 6, juntamente com suas especificações técnicas:

Tabela 6. Aparelhagem necessária à execução do Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Percursor Metálico.

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	Nº DE TOMBAMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Tanque de condicionamento para banho termoestabilizado	0800442	Sciamar	-	-
Equipamento para teste de impacto	0800068	Hammel Maskinfabrik A/S	B50 1252 - B	010399 - 12238
Percursor com ponta de impacto metálica massa 6,3 Kg	-	-	-	-
Percursor com ponta de impacto metálica massa 12,5 Kg	-	-	-	-
Balança digital	0403330	Toledo do Brasil	3400 - IV	9961310 5 - FA
Termômetro digital	800292	Fluke	51/51 II	-
Paquímetro Digital Capacidade 200mm Resolução 0.01 mm	40660	Mitutoyo	CDL-20CP	012121
Paquímetro Digital Capacidade 300mm Resolução 0.01 mm	40266	Mitutoyo	-	40266

O Equipamento para teste de impacto contempla um tubo guia metálico, o qual permite centralizar o percussor durante sua queda; um apoio de Aço, em forma de “V”, com ângulo de 120° e comprimento de 230 milímetros; um dispositivo de ajuste de altura de corpos de prova em relação ao tubo guia; um sistema ou dispositivo de frenagem, o qual impede o percussor dar mais de um impacto por queda no corpo-de-prova, sendo todo o conjunto apoiado sobre uma base de concreto, conforme mostrado na Figura 32.

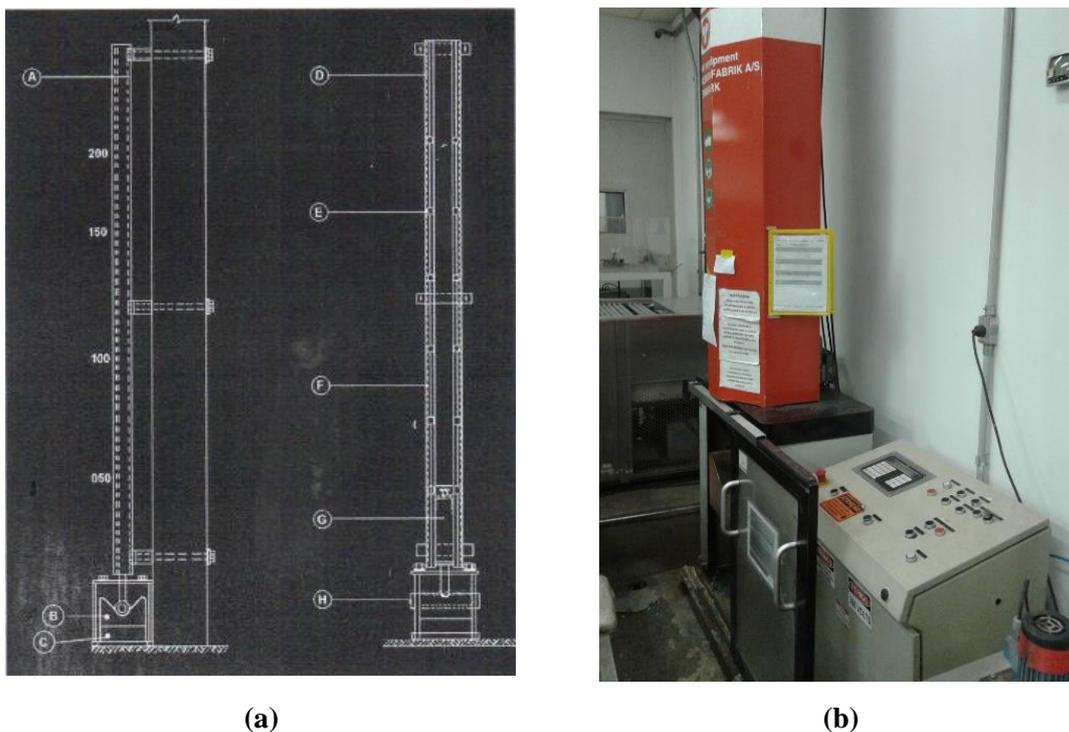


Figura 32. Equipamento para teste de impacto: (a) Desenho esquemático; (b) Equipamento em Laboratório ((a) Adaptado da Norma ABNT NBR 14262, 1999); (b) Mexichem, 2015).

5.2.1.3. Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram obtidos a partir de segmentos de tubos, com as extremidades cortadas em esquadro, extraídos de tubos selecionados de forma aleatória da linha de produção, estando livres de rebarbas e sujeiras, com comprimentos médios indicados na Tabela 5. De cada tubo foi extraído apenas um corpo de prova, conforme mostrado na Figura 33, sendo identificados conforme a Tabela 7.



Figura 33. Separação e identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Percursor Metálico (Mexichem, 2015).

Tabela 7. Identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Percursor Metálico.

Amostra	Ensaio	Nº Corpo de Prova		Identificação dos Corpos de Prova	
		PVC-U	PVC-O	PVC-U	PVC-O
1	1	1	5	1.1	5.1
		2	6	2.1	6.1
		3	7	3.1	7.1
		4	8	4.1	8.1

Foram traçados em cada corpo de prova linhas longitudinais simetricamente espaçadas entre si, atendendo ao número de impactos especificados na Tabela 9. As dimensões dos corpos de prova relativas aos diâmetros externos, espessura e comprimentos foram conferidos com os Paquímetros Digitais listados na Tabela 6, regulados pelos certificados de calibração números 025/457 e 116457, emitidos pela Empresa Oficial Soluções metrológicas, em 06/11/2014 e 23/01/2015, respectivamente, conforme mostrado na Figura 34.





Figura 34. Conferência de dimensões dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Percursor Metálico (Mexichem, 2015).

Posteriormente, os corpos de prova foram condicionados no tanque de banho termoestabilizado listado na Tabela 6, à temperatura de 0°C, durante 30 minutos, conforme mostrado na Figura 35.



(a)



(b)



(c)

Figura 35. Preparação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Percursor Metálico em banho termoestabilizado: (a) Tanque Termoestabilizado; (b) Imersão dos corpos de prova; (c) Controles de tempo e temperatura para estabilização dos corpos de prova (Mexichem, 2015).

5.2.1.4. Procedimento

Primeiramente foram verificados todos os parâmetros para avaliação de resistência ao impacto por percussor, definidos nas referências, no que diz respeito à massa do percussor, altura da queda e quantidade de impactos, para os dois tipos de tubos ensaiados, de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8. Parâmetros normativos para avaliação de resistência ao impacto por percussor.

Diâmetro Nominal	PVC-O			PVC-U		
	Massa do Percussor (Kg)	Altura da Queda (m)	Quantidade de Impactos	Massa do Percussor (Kg)	Altura da Queda (m)	Quantidade de Impactos
100	6,3	2,0	6	2,75	2,0	6

Para fins de comparação de limites extremos de resistências ao impacto, foram adotados nos ensaios dos dois tipos de tubos o percussor utilizado para o tubo com orientação molecular, assim como o percussor de maior massa disponível, conforme listado na Tabela 9 e mostrado na Figura 36.

Tabela 9. Parâmetros críticos para avaliação de resistência ao impacto por percussor.

Diâmetro Nominal	PVC-O			PVC-U		
	Massa do Percussor (Kg)	Altura da Queda (m)	Quantidade de Impactos	Massa do Percussor (Kg)	Altura da Queda (m)	Quantidade de Impactos
100	6,3	2,0	6	6,3	2,0	6
	12,5	2,0	6	12,5	2,0	6

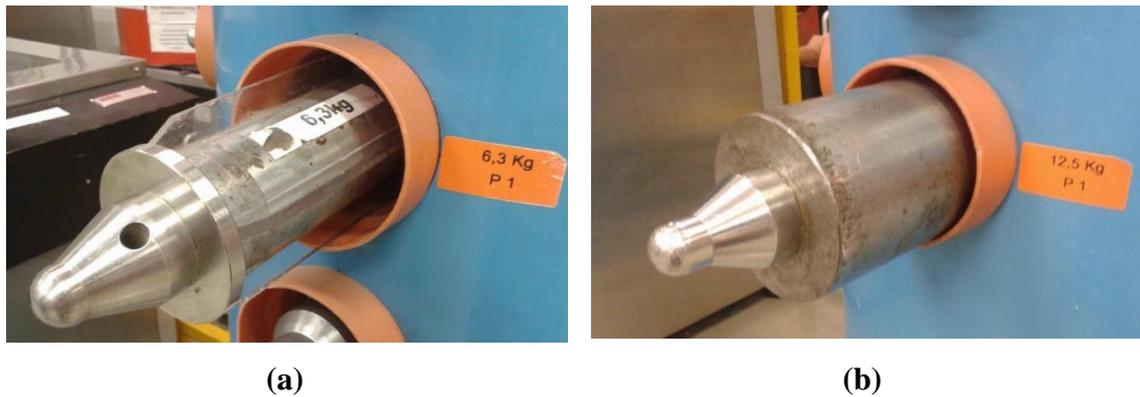


Figura 36. Percussores adotados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Percursor Metálico: (a) Percursor de massa 6,3 Kg; (b) Percursor de massa 12,5 Kg (Mexichem , 2015).

Os percussores metálicos cilíndricos foram dimensionados com ponta de impacto metálica, diâmetro de vinte e cinco milímetros, raio de doze milímetros e meio, livre de rebarbas ou de outras imperfeições. O desenho esquemático dos percussores é mostrado na Figura 37.

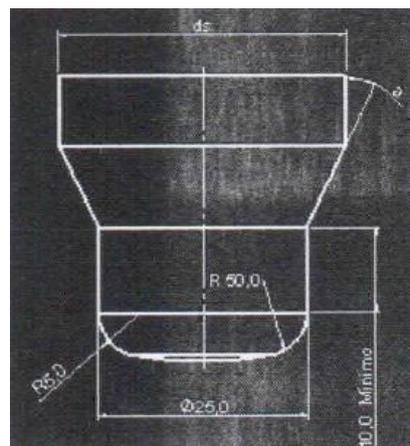


Figura 37. Desenho esquemático dos percussores adotados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Percursor Metálico (Adaptado da Norma ABNT NBR 14262, 1999).

Posteriormente, os percussores de impacto tiveram suas massas medidas, para fins de verificação das suas massas, na Balança Digital listada na Tabela 6, regulada pelo certificado de calibração número BAL-133-2015, emitido pela Empresa Balanças Brasil, em 12/05/2015, conforme mostrado na Figura 38.



Figura 38. Medição das massas dos percussores adotados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Percursor Metálico: (a) Percursor de massa 6,3 Kg; (b) Percursor de massa 12,5 Kg (Mexichem, 2015).

Em seguida, foram ajustadas as alturas dos apoios de aço em forma de “V” em relação à extremidade inferior do tubo guia, conforme os diâmetros dos corpos de prova, para o posterior posicionamento dos percussores metálicos no tubo guia, na altura de queda especificada, conforme mostrado na Figura 39.



Figura 39. Ajuste do equipamento para teste de impacto: (a) Posicionamento das alturas dos apoios; (b) Controle da altura de queda (Mexichem, 2015).

Por fim, os corpos de prova foram colocados no apoio em “V”, deixando-se os percussores caírem sobre eles, tendo-se o cuidado de reposicioná-los a cada queda do percussor, de modo que este não atinja o mesmo ponto do corpo de prova mais de uma vez, conforme mostrado na Figura 40.



(a)

(b)

Figura 40. Posicionamento dos corpos de prova no equipamento para teste de impacto: (a) Tubo com orientação molecular; (b) Tubo sem orientação molecular (Mexichem, 2015).

5.2.2. Ensaio de Verificação da Resistência à Pressão Hidrostática Interna

O objetivo deste Ensaio é verificar a resistência à pressão hidrostática interna de curta duração de tubos em PVC, com e sem orientação molecular, quando submetido a rampas de carga hidráulica em tempos pré-definidos, até a fratura.

5.2.2.1. Normas de referência e documentos complementares

- ABNT NBR 7665:2007 – Sistemas para adução e distribuição de água – Tubos de PVC 12 DEFOFO com junta elástica – Requisitos.
- ABNT NBR 15750:2009 – Tubulações de PVC-O (cloreto de polivinila não plastificado orientado) para sistemas de transporte de água ou esgoto sob pressão – Requisitos e métodos de ensaios.
- ABNT NBR 5683:1999 – Tubos de PVC – Verificação da resistência à pressão hidrostática interna.
- Instrução de Trabalho Mexichem ITR 0513 – PHI Tubos.

5.2.2.2. Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução do ensaio está listada na Tabela 10, juntamente com suas especificações técnicas:

Tabela 10. Aparelhagem necessária à execução do Ensaio de Verificação da Resistência à Pressão Hidrostática Interna.

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	Nº DE TOMBAMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Equipamento de pressurização com regulador de pressão para teste de pressão hidrostática interna	0800212	IPT	-	-
Software IPT Datalogging	-	IPT	V4.0	-
Tanque de condicionamento com banho termoestabilizado para teste de pressão hidrostática interna	0800213	IPT	-	-
Tampões com CAPS de vedação com peças de conexão para montagem e acoplamento para corpos de prova	-	-	-	-
Termômetro digital	800292	Fluke	51/51 II	-

A aparelhagem para teste de verificação da resistência à pressão hidrostática interna é mostrada na Figura 41.



Figura 41. Aparelhagem para teste de verificação da resistência à pressão hidrostática interna: (a) Tanque de condicionamento com banho termoestabilizado; (b) Equipamento de pressurização com regulador de pressão (Mexichem, 2015).

5.2.2.3. Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram obtidos a partir de segmentos de tubos, com as extremidades cortadas em esquadro, extraídos de tubos selecionados aleatoriamente da linha de produção, estando livres de rebarbas e sujeiras, com comprimentos médios livres entres os tampões indicados na Tabela 5. Foram introduzidas as pontas às bolsas, com a ancoragem de anéis para evitar a sua expulsão da bolsa, por meios mecânicos. De cada tubo foi extraído apenas um corpo de prova, conforme mostrado na Figura 42, sendo identificados conforme a Tabela 11.



Figura 42. Separação e identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de verificação da resistência à pressão hidrostática interna (Mexichem, 2015).

Tabela 11. Identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de verificação da resistência à pressão hidrostática interna.

Amostra	Ensaio	Nº Corpo de Prova		Identificação dos Corpos de Prova	
		PVC-U	PVC-O	PVC-U	PVC-O
		1	5	1.2	5.2
2	2	2	6	2.2	6.2
		3	7	3.2	7.2

As peças de conexão e de montagem, assim como os tampões foram conectadas de forma a assegurar uma perfeita estanqueidade do conjunto corpos de prova e equipamento de pressurização, assim como permitir a livre variação longitudinal e radial dos corpos de prova, durante todo o ensaio, conforme mostrado na Figura 43.

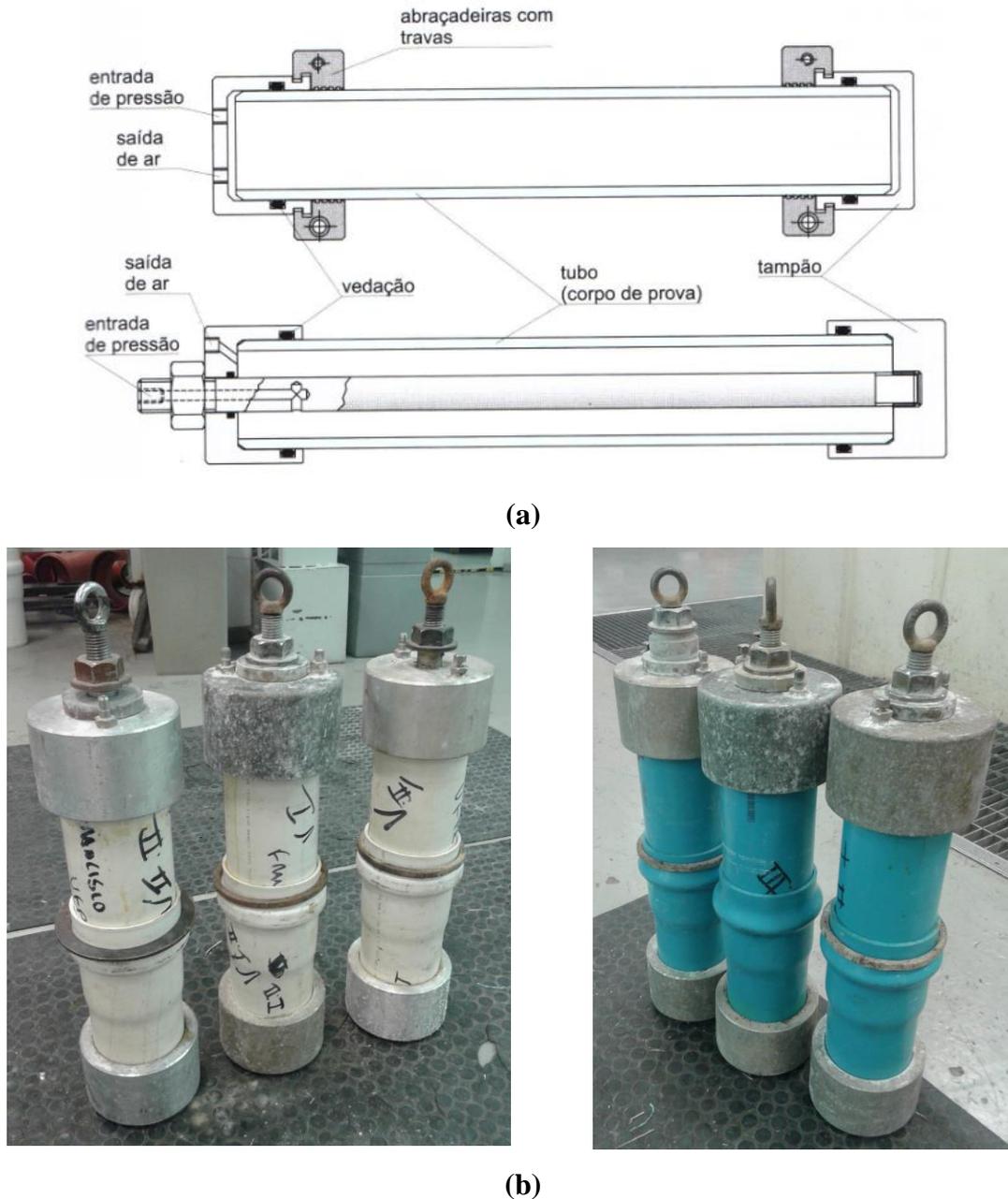


Figura 43. Montagens dos conjuntos corpos de prova – peças de conexão – tampões, utilizados no Ensaio de verificação da resistência à pressão hidrostática interna. (a) Desenho esquemático; (b) Montagens em Laboratório ((a) Danieletto, 2014); (b) Mexichem, 2015).

5.2.2.4. Procedimento

Primeiramente foram fechadas as extremidades dos corpos de prova com os CAPS, sendo cheios com água, a temperatura de 20°C. Posteriormente, os corpos de prova foram conectados ao equipamento de pressurização, contemplando também a purga de todo o ar do interior do sistema. Em seguida, os corpos de prova foram

condicionados totalmente submersos no banho termoestabilizado à temperatura de ensaio, por uma hora, de forma a não permitir que eles sejam encurvados ou deformados enquanto submetidos ao ensaio, e que não sejam impedidos de variarem suas dimensões, evitando assim seus contatos com as paredes do tanque, conforme mostrado na Figura 44.

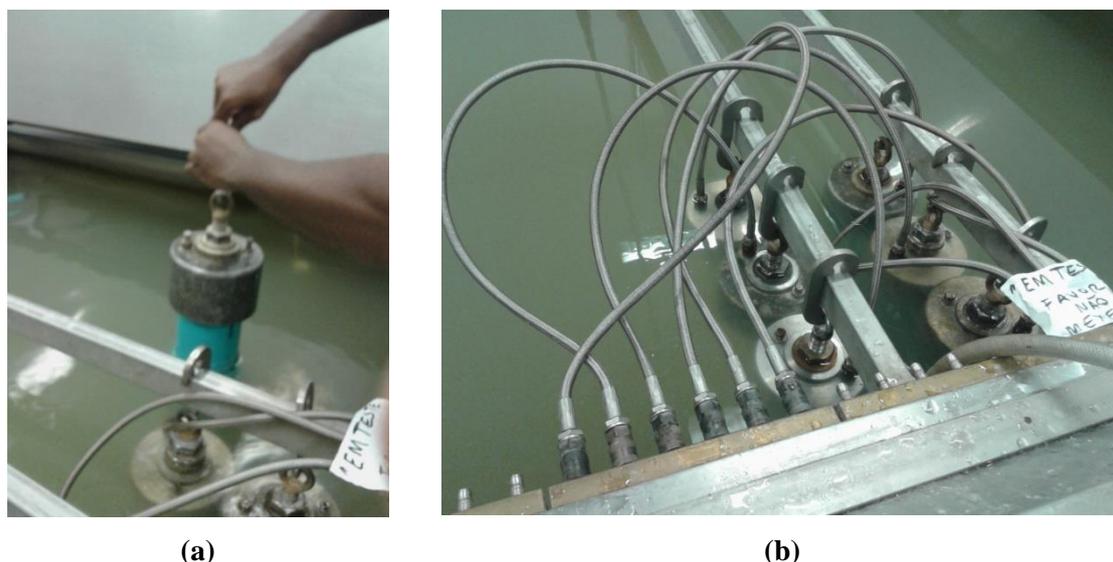


Figura 44. Preparação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de verificação da resistência à pressão hidrostática interna (a) Conexão dos corpos de prova ao sistema de pressurização; (b) Imersão e termoestabilização dos corpos de prova (Mexichem, 2015).

Enquanto os corpos de prova se mantiveram imersos em banho termoestabilizado, foram parametrizadas no equipamento de pressurização as seguintes rampas de pressão e tempo, por meio do Software IPT Datalogging V4.0, de acordo com a Tabela 12, e conforme mostrado na Figura 45.

Tabela 12. Parametrização de rampas de pressão e tempo no equipamento de pressurização, por meio do Software IPT Datalogging V4.0.

PARAMETRIZAÇÃO DA RAMPA	PRESSÃO INICIAL DA RAMPA (bar)	PRESSÃO FINAL DA RAMPA (bar)	TEMPO DE APLICAÇÃO DA PRESSÃO (horas)
0	0	10	1
1	10	20	1
2	20	30	1
3	30	40	1
4	40	50	1
5	50	60	1

Por fim, após o tempo mínimo de condicionamento, foram ajustadas e aplicadas as pressões hidrostáticas internas listadas na Tabela 12, elevando-as gradativamente faixa a faixa de rampa de pressão, sem Golpes de Aríete (MOLL, 2010).

Foi computado o tempo de ensaio a partir do instante em que a pressão estabilizou-se, iniciando-se assim o monitoramento e controle do mesmo, de forma a manter as mesmas condições pelo período estipulado, conforme mostrado na Figura 45.

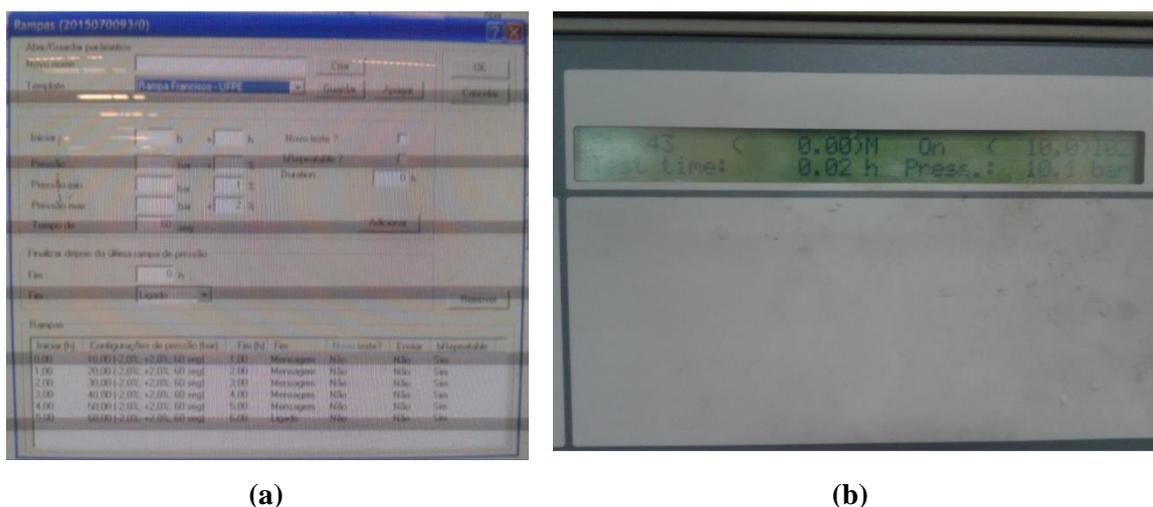


Figura 45. Execução do Ensaio de verificação da resistência à pressão hidrostática interna: (a) Parametrização das rampas de pressão; (b) Controle de pressão e tempo de ensaio (Mexichem, 2015).

5.2.3. Ensaio de Verificação da Resistência ao Cloreto de Metileno (Grau de Gelificação)

O objetivo deste Ensaio é verificar a homogeneidade das propriedades mecânicas e suas variações ao longo do comprimento do tubo, através da verificação da homogeneidade da gelificação, quando da avaliação resistência ao ataque químico, por cloreto de metileno.

5.2.3.1. Normas de referência e documentos complementares

- ABNT NBR 7665:2007 (Anexo C) – Ensaio de resistência ao cloreto de metileno em temperatura específica.

- ABNT NBR 15750:2009 (Anexo C) – Ensaio de resistência ao cloreto de metileno em temperatura específica.
- Instrução de Trabalho Mexichem ITR 0805 – Grau de gelificação em Tubos.

5.2.3.2. Aparelhagem e Reagente

A aparelhagem e reagente necessários à execução do ensaio estão listados na Tabela 13, juntamente com suas especificações técnicas:

Tabela 13. Aparelhagem necessária à execução do Ensaio de Verificação da Resistência ao Cloreto de Metileno (Grau de Gelificação).

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO / REAGENTES	Nº DE TOMBAMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Estufa microprocessada com controle termostático	0800443	Quimis	Q134M292	1307095
Tanque de condicionamento para banho termoestabilizado em cloreto de metileno	0409054	Sciamar	-	-
Relógio temporizador	-	Steck	LE3S	-
Termômetro digital	800292	Fluke	51/51 II	-
Torno Mecânico	-	Romi	Mach 9	-
Recipiente em aço inoxidável para acomodação de corpos de prova	-	-	-	-
Cloreto de metileno de grau técnico	-	-	-	-

A aparelhagem para teste de verificação da resistência ao cloreto de metileno é mostrada na Figura 46.

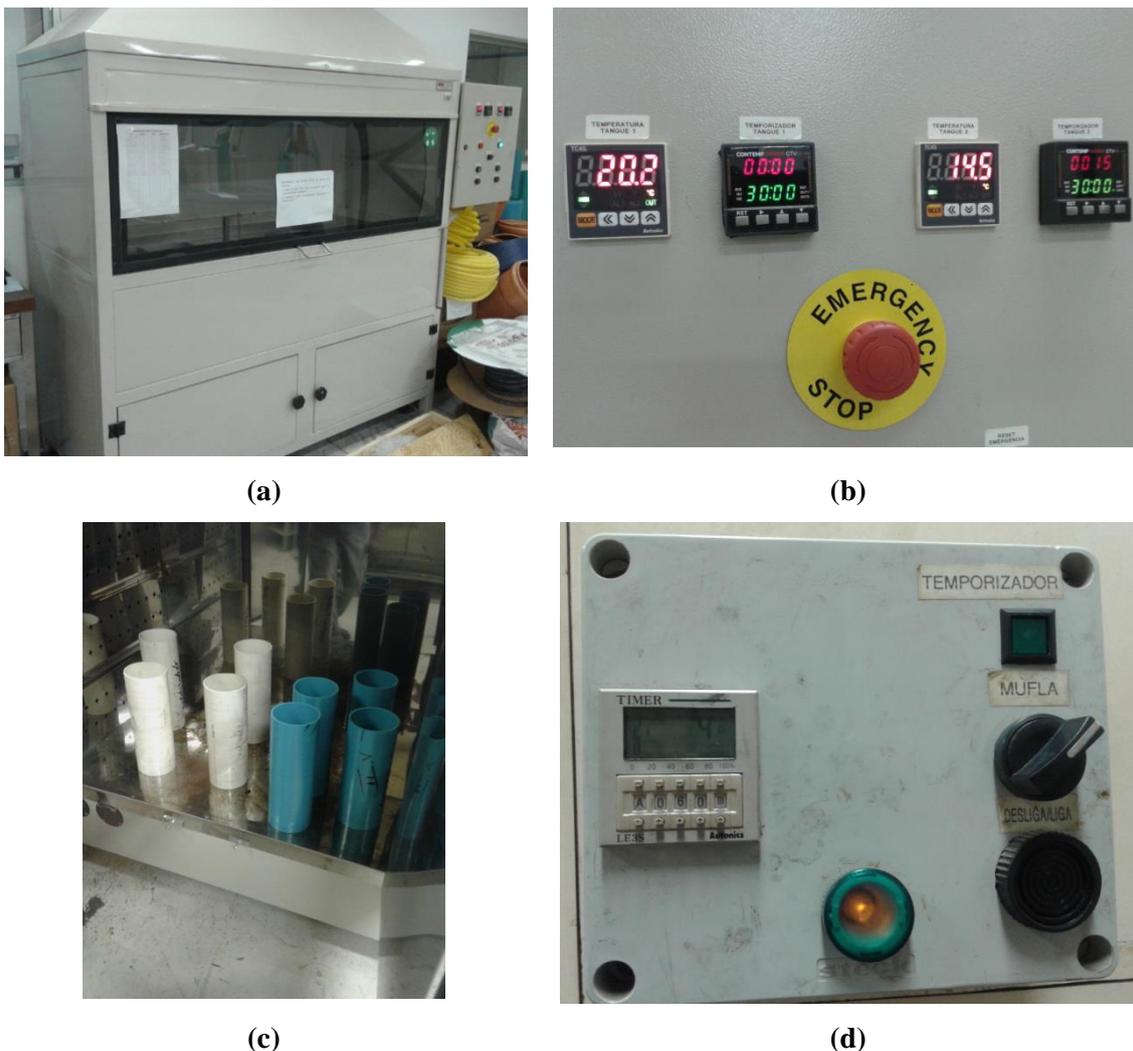


Figura 46. Aparelhagem para teste de Resistência ao Cloreto de Metileno (Grau de Gelificação): (a) Tanque de condicionamento para banho termoestabilizado em cloreto de metileno; (b) Controle digital de temperatura e tempo, (c) Estufa microprocessada com controle termostático; (d) Relógio temporizador (Mexichem, 2015).

O reagente utilizado neste ensaio é o cloreto de metileno de grau técnico que contém pequenas quantidades (1% no máximo de cada) de clorometano (CH_3Cl), de triclorometano (CHCl_3) e de tetraclorometano (CCl_4). A temperatura de ebulição do cloreto de metileno é baixa (40°C), conseqüentemente, é gerada alta pressão de vapor na temperatura ambiente. Além disso, o cloreto de metileno pode ser tóxico à pele e aos olhos, sendo, portanto, necessário tomar precauções ao ter contato com o reagente ou com os corpos de prova nele imersos. Os vapores liberados também são tóxicos. Para tal, a área que o recipiente está localizado, assim como onde a secagem dos corpos de prova foi realizada são dotadas de ventilação. Toda a área de ensaio é coberta.

5.2.3.3. Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram obtidos a partir de segmentos de tubos, com as extremidades cortadas em esquadro, extraídos de tubos selecionados aleatoriamente da linha de produção, estando livres de rebarbas e sujeiras, com comprimentos médios livres entres os tampões indicados na Tabela 5. De cada tubo foi extraído apenas um corpo de prova. De forma a possibilitar o seu retorno à forma original (pré-forma), somente os corpos de prova retirados de tubos com orientação molecular foram acondicionados na estufa, regulada pelo certificado de calibração número 1435/13, emitido pela Empresa Quimis, em 05/08/2013, sob uma temperatura de 150°C, por um período de 30 minutos, sendo posteriormente resfriados até a temperatura ambiente, conforme mostrado na Figura 47, sendo identificados conforme a Tabela 14.



Figura 47. Separação e acondicionamento em estufa dos corpos de prova com orientação molecular, utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Cloreto de Metileno (Grau de Gelificação), com controle de temperatura (Mexichem, 2015).

Tabela 14. Identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Cloreto de Metileno (Grau de Gelificação).

Amostra	Ensaio	Nº Corpo de Prova		Identificação dos Corpos de Prova	
		PVC-U	PVC-O	PVC-U	PVC-O
3	3	1	5	1.3	5.3
		2	6	2.3	6.3
		3	7	3.3	7.3
		4	8	4.3	8.3

Em seguida, foram usinados chanfros com 10 milímetros de comprimento e ângulo de 10 graus, de forma a abranger toda a espessura de parede dos tubos, sem posteriores acabamentos, como lixamento da superfície do chanfro, após a sua confecção, conforme mostrado na Figura 48.



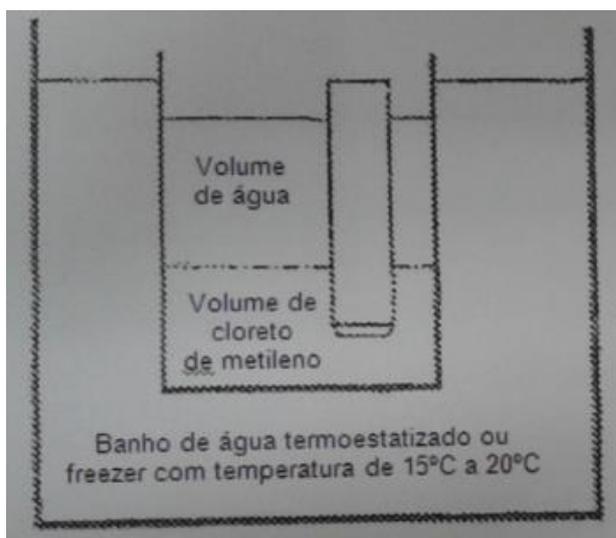
Figura 48. Confecção de chanfros nos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Cloreto de Metileno (Grau de Gelificação) (Mexichem, 2015).

5.2.3.4. Procedimento

Primeiramente foi colocado no recipiente de ensaio o cloreto de metileno em quantidade suficiente para cobrir a superfície chanfrada do corpo de prova, cobrindo o reagente com uma camada de água de 300 milímetros. Foram utilizados controles de temperatura mostrados na Figura 46, de forma a atingir e manter a temperatura do cloreto de metileno no recipiente em 15°C. Para racionalizar o consumo de cloreto de metileno, foi utilizado um recipiente com dimensões próximas as dos corpos de prova,

colocado dentro de um recipiente maior, preenchido com água. O controle de temperatura e agitação foi realizado no recipiente maior.

Em seguida, os corpos de prova foram imersos no líquido, onde a parte chanfrada ficou totalmente imersa no cloreto de metileno durante 30 minutos, conforme mostrado na Figura 49. Após este período de imersão, os corpos de prova foram colocados na posição vertical, de forma a proporcionar o escoamento do reagente, durante 15 minutos.



(a)



(b)

Figura 49. Imersão dos corpos de prova em cloreto de metileno. (a) Desenho esquemático; (b) Corpos de prova imersos em laboratório. (Mexichem, 2015).

Por fim, os corpos de prova foram removidos dos recipientes e deixados ao ar livre para secagem, durante 15 minutos, tempo necessário à evaporação da água. Durante todo ensaio, foi evitado o contato dos dedos com o corpo de prova, sendo utilizadas luvas e pinças para manuseio.

5.2.4. Ensaio de Verificação da Resistência à Compressão Diametral

O objetivo deste Ensaio é verificar a resistência à compressão diametral de tubos em PVC, com e sem orientação molecular, quando submetido carga constante, até o nível máximo de deformação pré-definido, antes da fratura.

5.2.4.1. Normas de referência e documentos complementares

- ABNT NBR 7665:2007 – Sistemas para adução e distribuição de água – Tubos de PVC 12 DEFOFO com junta elástica – Requisitos.
- ABNT NBR 15750:2009 – Tubulações de PVC-O (cloreto de polivinila não plastificado orientado) para sistemas de transporte de água ou esgoto sob pressão – Requisitos e métodos de ensaios.
- ABNT NBR 14272:1999 – Tubos de PVC – Verificação da compressão diametral.
- Instrução de Trabalho Mexichem ITR 0782 – Verificação da Resistência à Compressão.

5.2.4.2. Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução do ensaio está listada na Tabela 15, juntamente com suas especificações técnicas:

Tabela 15. Aparelhagem necessária à execução do Ensaio de Verificação da Resistência à Compressão Diametral.

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	Nº DE TOMBAMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Paquímetro Digital Capacidade 200mm Resolução 0.01 mm	40660	Mitutoyo	CDL-20CP	012121
Paquímetro Digital Capacidade 300mm Resolução 0.01 mm	40266	Mitutoyo		40266
Circômetro Capacidade 15 - 115 mm	41810	Schwenk	C115	-
Máquina universal de ensaios Capacidade 100 kN	0800418	Emic	DL10000	-

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	Nº DE TOMBAMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Tanque de condicionamento com banho termostabilizado para teste de compressão diametral	0800213	IPT	-	-

A aparelhagem para teste de verificação da resistência à compressão diametral é mostrada na Figura 50.

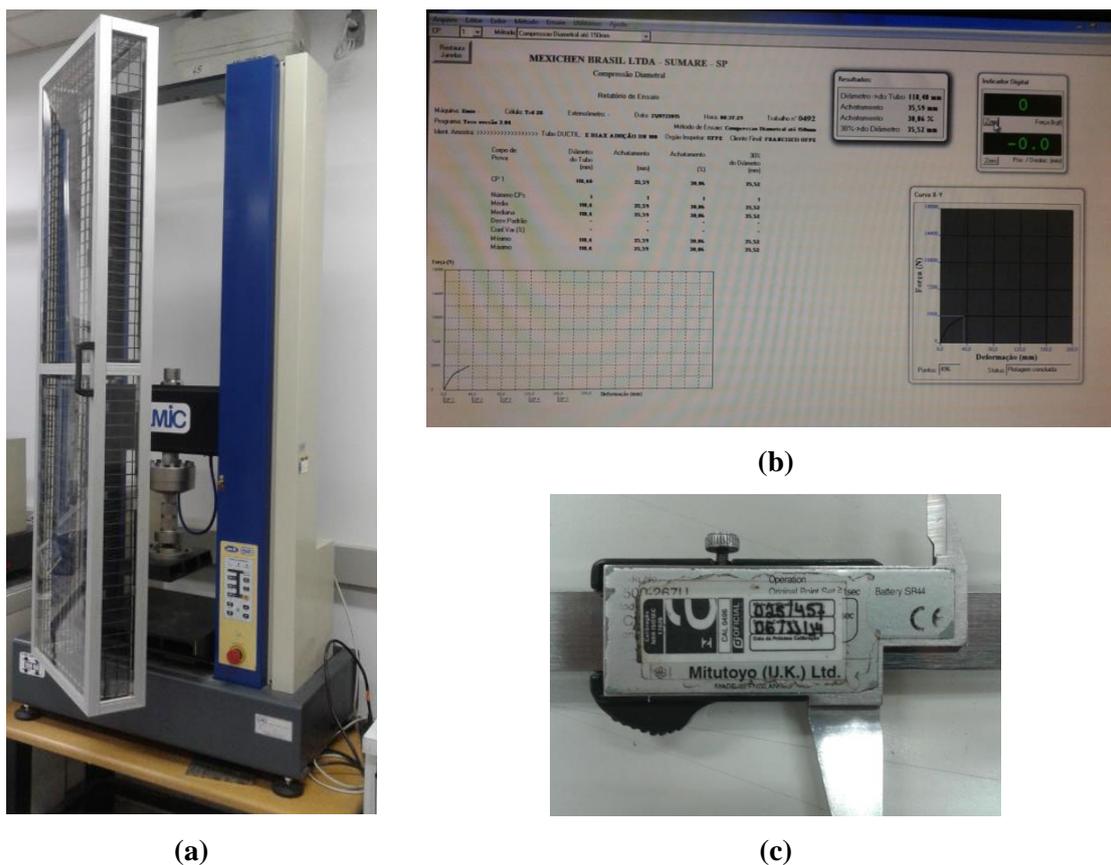


Figura 50. Aparelhagem para teste de verificação da resistência à compressão diametral: (a) Máquina universal de ensaios Capacidade 100 kN; (b) Visão geral da tela de trabalho gerada a partir do Software para parametrização de ensaios mecânicos Tesc; (c) Paquímetro Digital Capacidade 200mm Resolução 0.01 mm ((a) Mexichem, 2015); (b) Adaptado da tela do Software para parametrização de ensaios mecânicos Tesc Emic Full 3.04, 2015); (c) Mexichem, 2015).

5.2.4.3. Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram obtidos a partir de segmentos de tubos, com as extremidades cortadas em esquadro, extraídos de tubos selecionados aleatoriamente da

linha de produção, estando livres de rebarbas e sujeiras, com comprimentos médios livres entres os tampões indicados na Tabela 5.

De cada tubo foi extraído apenas um corpo de prova, sendo acondicionados em banho termostabilizado, sob uma temperatura de 20°C, por um período de duas horas, depois tendo suas dimensões relativas aos respectivos diâmetros externos conferidas com o Circômetro listado na Tabela 15, regulado pelo certificado de calibração número 106457, emitido pela Empresa Oficial, em 19/12/2014, com o intuito de ensaiá-los no máximo em até cinco minutos após o condicionamento térmico, conforme mostrado na Figura 51, sendo identificados conforme a Tabela 16.



Figura 51. Conferência de dimensões dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência à Compressão Diametral (Mexichem, 2015).

Tabela 16. Identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de verificação da resistência compressão diametral.

Amostra	Ensaio	Nº Corpo de Prova		Identificação dos Corpos de Prova	
		PVC-U	PVC-O	PVC-U	PVC-O
4	4	1	5	1.4	5.4
		2	6	2.4	6.4
		3	7	3.4	7.4
		4	8	4.4	8.4

5.2.4.4. Procedimento

Primeiramente, foram inseridos todos os parâmetros do ensaio no Software Emic Tesc Full 3.04, o qual se comunica com a respectiva Máquina Universal de Ensaaios, no que diz respeito à quantidade de corpos de prova, tipos dos tubos, diâmetros externos dos tubos, conforme mostrado na Figura 52.

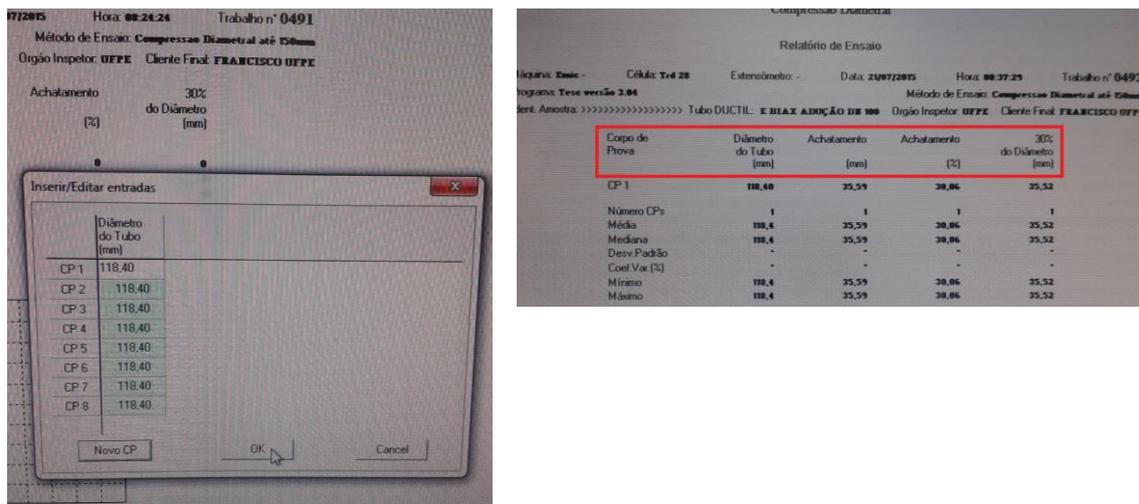


Figura 52. Inserção de parâmetros do Ensaio de Verificação da Resistência à Compressão Diametral no Software Emic Tesc Full 3.04. (Adaptado da tela do Software para parametrização de ensaios mecânicos Tesc Emic Full 3.04, 2015).

Em seguida, os corpos de prova foram colocados na região compreendida entre os pratos da Máquina Universal de Ensaaios Capacidade 100 kN, regulada pelo certificado de calibração número 11815 emitido pela Empresa Emic, em 05/04/2015, conforme mostrado na Figura 53, de forma a prendê-los através de uma força de 5 Newtons, ajustando posteriormente o indicador de deslocamento vertical para a referência zero da Máquina.

Depois, os corpos de prova foram achatados com velocidade constante de 12 milímetros por minuto, de forma a interromper o ensaio quando ocorrer deflexão de 30% em relação ao diâmetro externo inicial dos Corpos de Prova, conforme mostrado na Figura 53, e podendo ser calculada pela Equação 14 (NBR 14272, 1999).

$$h_f = 0,7 \times h_i \quad (14)$$

Na equação 14, h_f é a distância final entre os pratos da Máquina, expressa em milímetros (mm) e h_i é a distância inicial entre os pratos da Máquina, expressa em milímetros (mm), a qual deve coincidir com o diâmetro externo dos Corpos de Prova.

Por fim, para comparação dos níveis de resistência à compressão dos Corpos de Prova retirados dos tubos com e sem orientação molecular, os mesmos foram submetidos a níveis extremos de deflexão (55 e 80%), sendo posteriormente quantificadas as suas respectivas forças de compressão aplicadas.

Foi observado, com a compressão diametral mantida, as possibilidades de ocorrências de trincas, rasgos, delaminações ou quebras dos Corpos de Prova. O carregamento foi posteriormente aliviado, retirando os Corpos de Prova dos pratos da Máquina.

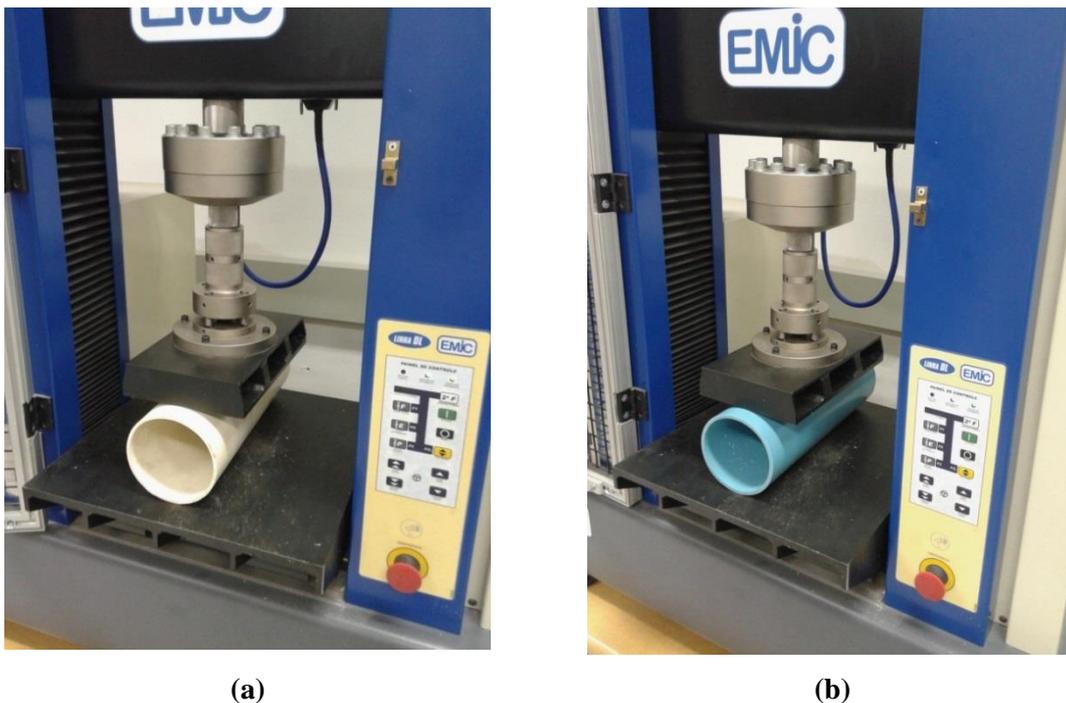


Figura 53. Realização do Ensaio de Verificação da Resistência à Compressão Diametral. (a) Tubos com Orientação Molecular; (b) Tubos sem Orientação Molecular (Mexichem, 2015).

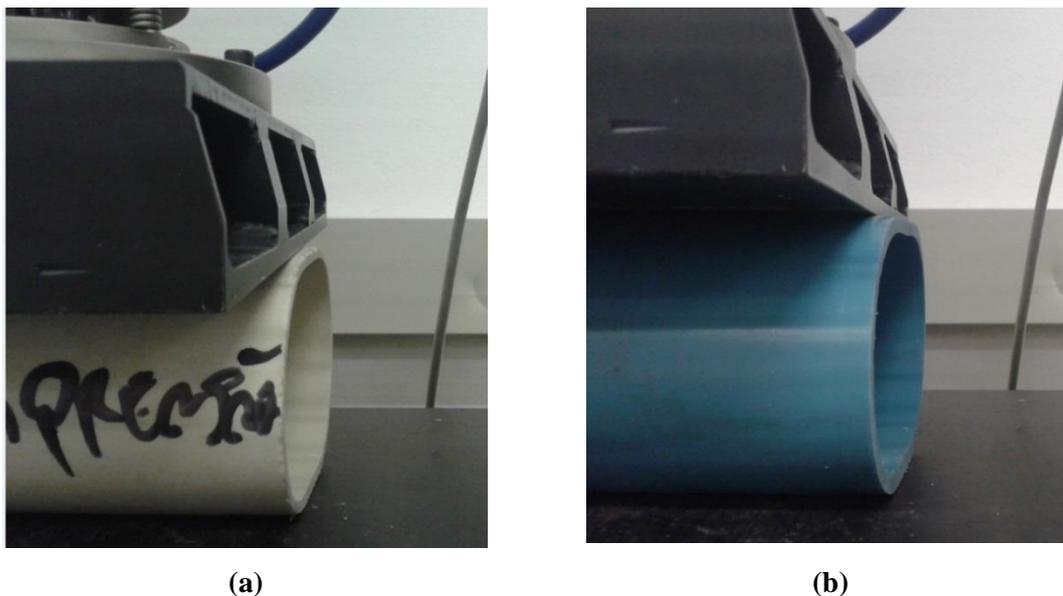


Figura 53. Realização do Ensaio de Verificação da Resistência à Compressão Diametral. (a) Tubos com Orientação Molecular; (b) Tubos sem Orientação Molecular (Mexichem, 2015).

5.2.5. Ensaio de Verificação da Estabilidade Dimensional

O objetivo deste Ensaio é verificar a capacidade de estabilização dimensional, por meio da quantificação da variação longitudinal máxima de tubos em PVC, com e sem orientação molecular, quando submetidos a variações de temperaturas pré-definidas.

5.2.5.1. Normas de referência e documentos complementares

- ABNT NBR 7665:2007 – Sistemas para adução e distribuição de água – Tubos de PVC 12 DEFOFO com junta elástica – Requisitos.
- ABNT NBR 15750:2009 – Tubulações de PVC-O (cloreto de polivinila não plastificado orientado) para sistemas de transporte de água ou esgoto sob pressão – Requisitos e métodos de ensaios.
- ABNT NBR 5687:1999 – Tubos de PVC – Verificação da estabilidade dimensional.
- Instrução de Trabalho Mexichem ITR 0508 – Verificação da Estabilidade Dimensional.

5.2.5.2. Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução do ensaio está listada na Tabela 17, juntamente com suas especificações técnicas:

Tabela 17. Aparelhagem necessária à execução do Ensaio de Verificação da Estabilidade Dimensional.

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	Nº DE TOMBAMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Paquímetro Digital Capacidade 200 mm Resolução 0.01 mm	40660	Mitutoyo	CDL-20CP	012121
Gabarito para marcação de corpos de prova	-	-	-	-
Estufa microprocessada	0800443	Quimis	Q134M292	1307095
Relógio temporizador	-	Steck	LE3S	-

A aparelhagem para teste de verificação da resistência à compressão diametral é mostrada na Figura 54.

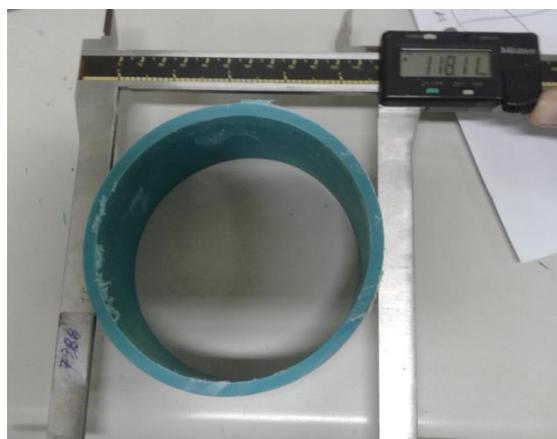
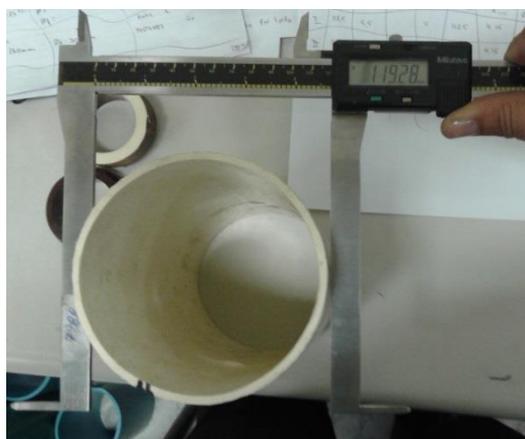


Figura 54. Aparelhagem para teste de verificação da estabilidade dimensional: (a) Gabarito para marcação de corpos de prova e Paquímetro Digital Capacidade 200mm Resolução 0.01 mm; (b) Relógio temporizador (Mexichem, 2015).

5.2.5.3. Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram obtidos a partir de segmentos de tubos, com as extremidades cortadas em esquadro, extraídos de tubos selecionados aleatoriamente da linha de produção, estando livres de rebarbas e sujeiras, com comprimentos indicados na Tabela 5, sendo identificados conforme listado na Tabela 18.

De cada tubo foi extraído apenas um corpo de prova, sendo conferidas todas as suas dimensões, também sendo traçadas sobre eles duas marcas circulares, em quatro posições diferentes, separadas entre si em 100 milímetros, de uma forma na qual uma das marcas ficasse a 10 milímetros de um das extremidades do corpo de prova. Todas as marcações foram confeccionadas por meio de gabarito, com as respectivas dimensões entre as pontas conferidas com o Paquímetro Digital listado na Tabela 17, regulado pelo certificado de calibração números 025/457, emitido pela Empresa Oficial Soluções Metrológicas, em 06/11/2014, com o intuito de garantir a confiabilidade da dimensão parametrizada no gabarito, conforme mostrado na Figura 55.



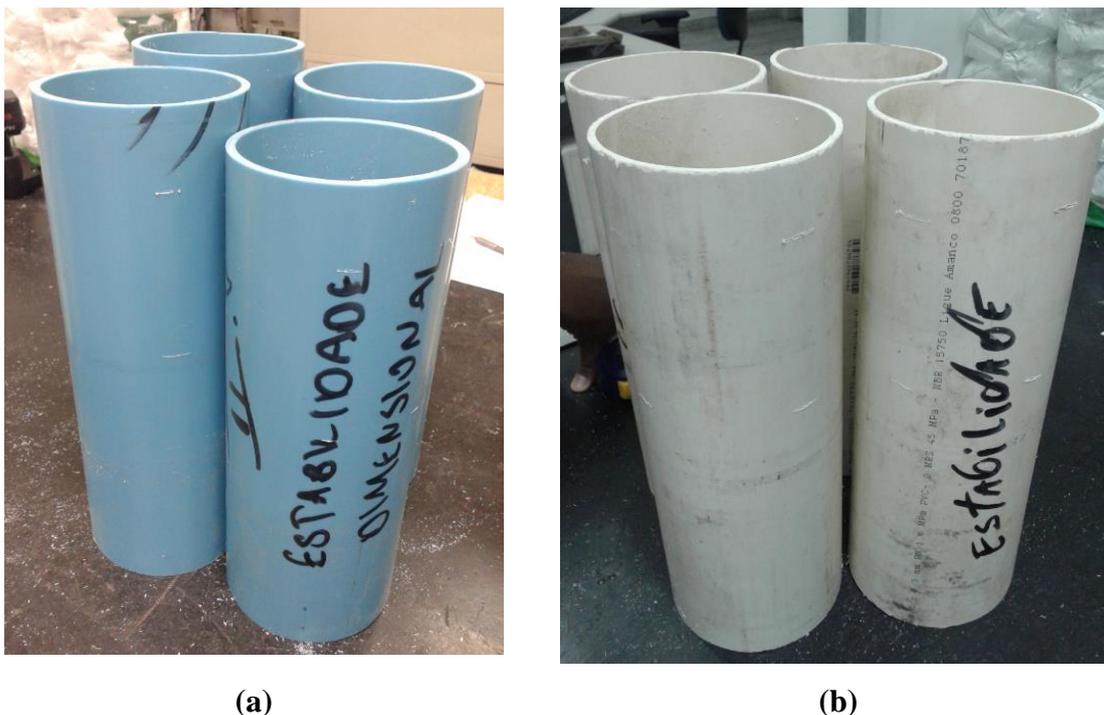


Figura 55. Conferência de dimensões e traçagem de marcações circulares nos corpos de prova traçadas com gabarito, na realização do Ensaio de Verificação da Estabilidade Dimensional: (a) Tubos sem orientação molecular; (b) Tubos com orientação molecular (Mexichem, 2015).

Tabela 18. Identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Estabilidade Dimensional.

Amostra	Ensaio	Nº Corpo de Prova		Identificação dos Corpos de Prova	
		PVC-U	PVC-O	PVC-U	PVC-O
5	5	1	5	1.5	5.5
		2	6	2.5	6.5
		3	7	3.5	7.5
		4	8	4.5	8.5

Posteriormente, os corpos de prova foram condicionados durante 02 horas à temperatura ambiente (25°C), sendo em seguida medidas as distâncias entre as marcas circulares em quatro geratrizes equidistantes entre si, e calculadas as médias das quatro medições (X_i) para cada corpo de prova, com aproximação para o décimo de milésimo mais próximo.

5.2.5.4. Procedimento

Primeiramente, foi regulado o termostato da estufa microprocessada listada na Tabela 17, regulada pelos certificados de calibração números 1435/13 e 1434/13, emitido pela Empresa Quimis, em 05/08/2013. Após a estabilização da temperatura em 150°C, os corpos de prova foram colocados na estufa, suspensos, de forma que não entrem em contato entre si ou com as paredes ou com o fundo da estufa, durante uma hora, conforme mostrado na Figura 56.



Figura 56. Posicionamento dos corpos de provas utilizados no Ensaio de Verificação da Estabilidade Dimensional em estufa microprocessada (Mexichem, 2015).

Em seguida, os corpos de prova foram retirados da estufa, sendo resfriados, suspensos, por uma hora, à temperatura ambiente (25°C).

Por fim, foram medidas as distâncias entre as marcas circulares em quatro geratrizes equidistantes entre si e calculada a média das quatro medições (X_f), para cada corpo de prova, com aproximação para o décimo de milésimo mais próximo, assim como todas as demais dimensões. Para cada corpo de prova, a variação longitudinal J , expressa em porcentagem, foi calculada pela Equação 15 (NBR 5687, 1999):

$$J = \frac{X_i - X_f}{X_i} \times 100 \quad (15)$$

Na Equação 15, X_i é a média aritmética da distância entre as marcas circulares antes do ensaio, expressa em milímetros (mm) e X_f é a média aritmética da distância entre as marcas circulares depois do ensaio, também expressa em milímetros (mm).

5.2.6. Ensaio de Determinação da Classe de Rigidez e Resistência ao Achatamento

O objetivo deste Ensaio é a determinação da classe de rigidez e resistência ao achatamento de tubos em PVC, com e sem orientação molecular, quando submetido carga constante, a partir da verificação do coeficiente angular de deformação do material e deflexão vertical sofrida.

5.2.6.1. Normas de referência e documentos complementares

- ABNT NBR 7665:2007 – Sistemas para adução e distribuição de água – Tubos de PVC 12 DEFOFO com junta elástica – Requisitos.
- ABNT NBR 15750:2009 – Tubulações de PVC-O (cloreto de polivinila não plastificado orientado) para sistemas de transporte de água ou esgoto sob pressão – Requisitos e métodos de ensaios.
- ABNT NBR 9053:1999 – Tubos de PVC – Determinação da classe de rigidez.
- Instrução de Trabalho Mexichem ITR 0525 – Classe de Rigidez / Achatamento – Tubos.

5.2.6.2. Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução do ensaio está listada na Tabela 19, juntamente com suas especificações técnicas:

Tabela 19. Aparelhagem necessária à execução do Ensaio de Determinação da Classe de Rigidez e Resistência ao Achatamento.

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO / REAGENTES	Nº DE TOMBAMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Paquímetro Digital Capacidade 200mm Resolução 0.01 mm	40660	Mitutoyo	CDL-20CP	012121
Paquímetro Digital Capacidade 300mm Resolução 0.01 mm	40266	Mitutoyo		40266
Circômetro Capacidade 15 - 115 mm	41810	Schwenk	C115	-
Máquina universal de ensaios Capacidade 100 kN	0800418	Emic	DL10000	-
Software para parametrização de ensaios mecânicos Tesc	-	Emic	Full	3.04
Taque de condicionamento com banho termoestabilizado para teste de compressão diametral	0800213	IPT	-	-

A aparelhagem para teste de verificação da resistência à compressão diametral é mostrada na Figura 57.

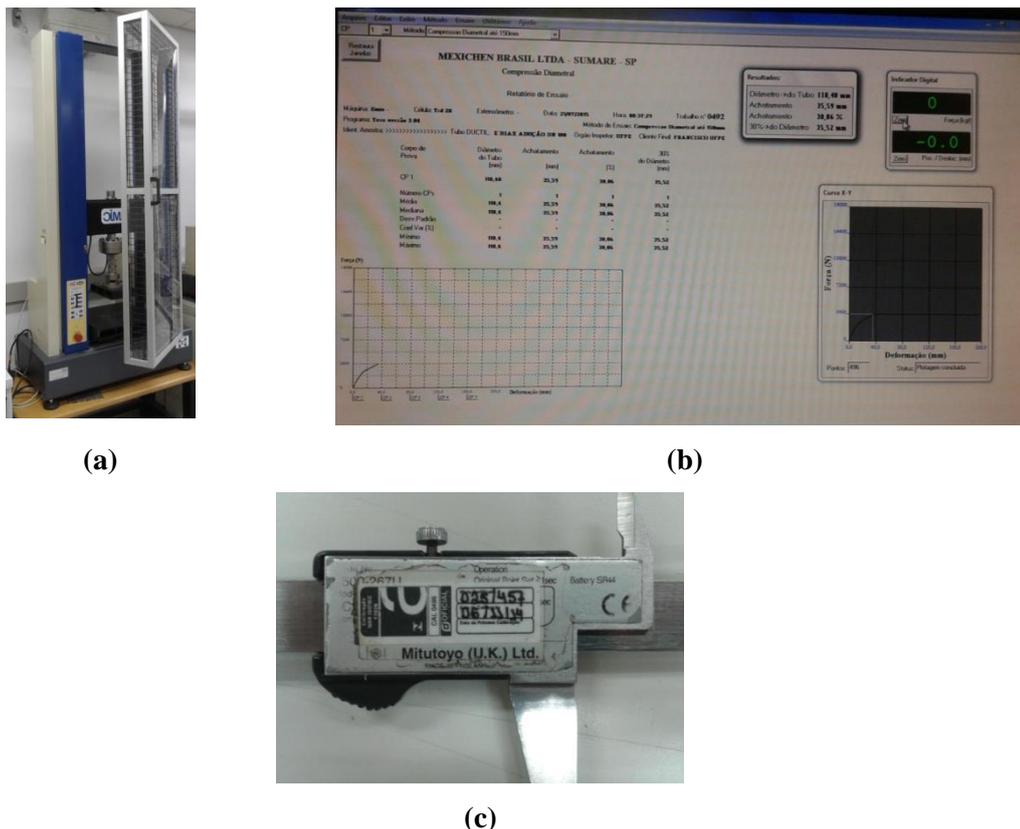


Figura 57. Aparelhagem para teste de verificação da resistência à compressão diametral: (a) Máquina universal de ensaios Capacidade 100 kN; (b) Visão geral da tela de trabalho gerada a partir do Software para parametrização de ensaios mecânicos Tesc; (c) Paquímetro Digital Capacidade 200mm Resolução 0.01 mm ((a) Mexichem, 2015); (b) Adaptado da tela do Software para parametrização de ensaios mecânicos Tesc Emic Full 3.04, 2015); (c) Mexichem, 2015).

5.2.6.3. Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram obtidos a partir de segmentos de tubos, com as extremidades cortadas em esquadro, extraídos de tubos selecionados aleatoriamente da linha de produção, estando livres de rebarbas e sujeiras, com comprimentos médios livres entres os tampões indicados na Tabela 5.

De cada tubo foi extraído apenas um corpo de prova, tendo seus comprimentos medidos em quatro geratrizes em si, sendo calculadas as médias aritméticas, aproximadas para o décimo de milésimo mais próximo, sendo posteriormente acondicionados em banho termoestabilizado, sob uma temperatura de 20°C, por um período de duas horas, depois tendo suas dimensões conferidas com o Paquímetro Digital listado na Tabela 19, regulado pelo certificado de calibração números 025/457,

emitido pela Empresa Oficial Soluções Metrológicas, em 06/11/2014, sendo identificados conforme a Tabela 20.

Tabela 20. Identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de determinação da classe de rigidez e resistência ao achatamento.

Amostra	Ensaio	Nº Corpo de Prova		Identificação dos Corpos de Prova	
		PVC-U	PVC-O	PVC-U	PVC-O
6	6	1	5	1.6	5.6
		2	6	2.6	6.6
		3	7	3.6	7.6
		4	8	4.6	8.6

5.2.6.4. Procedimento

Primeiramente, foram inseridos todos os parâmetros do ensaio no Software Emic Tesc Full 3.04, o qual se comunica com a respectiva Máquina Universal de Ensaio, no que se diz respeito à quantidade de corpos de prova, tipos, comprimentos, espessuras, e diâmetros externos conforme mostrado na Figura 58.

Máquina: **Emic** - Célula: **Trd 28** Extensômetro: - Data: **21/07/2015** Hora: **10:58:11** Trabalho nº **0495**
 Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Rigidez do anel Biax 100**
 Ident. Amostra: > CR Mínima: **4000** Tubo: **TUBO DUCTILFORT E BIAx DN 100** Norma: **NBR 15750 - FRANCISCO UFPE**

Corpo de Prova	Comprimento (m)	Diâmetro do Tubo (mm)	Espessura Mínima (mm)	Rigidez do anel (Pa)	Força Máxima (N)	Constante Elástica (N/m)	3% do Diâmetro (mm)
CP 1	0,300	109,00	0,00	26037	1297,87	403673,78	3,27
CP 2	0,300	109,00	0,00	25844	1291,11	400677,00	3,27
CP 3	0,300	109,00	0,00	24659	1257,31	382305,13	3,27
CP 4	0,300	109,00	0,00	26247	1331,67	406933,09	3,27
CP 5	0,300	109,00	0,00	13684	679,35	212162,14	3,27
CP 6	0,300	109,00	0,00	13938	716,53	216096,31	3,27
CP 7	0,300	109,00	0,00	13258	669,21	205549,69	3,27
CP 8	0,300	109,00	0,00	13975	716,53	216664,28	3,27
Número CPs	8	8	8	8	8	8	8
Média	0,3000	109,0	0,0000	19710	994,9	305500	3,270
Desv. Padrão	0,0000	0,0000	0,0000	6426	321,3	99620	0,0000
Coef. Var. (%)	0,0000	0,0000	*	32,61	32,29	32,61	0,0000
Mínimo	0,3000	109,0	0,0000	13260	669,2	205500	3,270
Máximo	0,3000	109,0	0,0000	26250	1332	406900	3,270

Figura 58. Inserção de parâmetros do Ensaio de determinação da classe de rigidez e resistência ao achatamento no Software Emic Tesc Full 3.04 (Adaptado da tela do Software para parametrização de ensaios mecânicos Tesc Emic Full 3.04, 2015).

Em seguida, os corpos de prova foram colocados na região compreendida entre os pratos da Máquina Universal de Ensaio listada na Tabela 19, regulada pelo certificado de calibração número 11815 emitido pela Empresa Emic, em 05/04/2015, conforme mostrado na Figura 59, de forma a prendê-los através de uma força de 5 Newtons, ajustando posteriormente o indicador de deslocamento vertical para a referência zero da Máquina.

Por fim, os corpos de prova foram achatados com velocidade constante de 2 milímetros por minuto, registrando os valores de força aplicada e deflexão indicados nos dispositivos, de forma a interromper o ensaio quando ocorrer deflexão percentual de 3% em relação ao diâmetro externo inicial dos Corpos de Prova, conforme mostrado na Figura 59. A deflexão vertical (ΔV), sofrida pelo corpo de prova em relação ao seu diâmetro inicial, medida na direção da carga aplicada pode ser calculada pela Equação 16 (NBR 9053, 1999):

$$\Delta V = (h_i - h_f) \quad (16)$$

Foi observado, com a compressão diametral mantida, as possibilidades de ocorrências de trincas, rasgos, delaminações ou quebras dos Corpos de Prova. O carregamento foi posteriormente aliviado, retirando os Corpos de Prova dos pratos da Máquina. O achatamento foi realizado em locais diferentes, para cada corpo de prova.

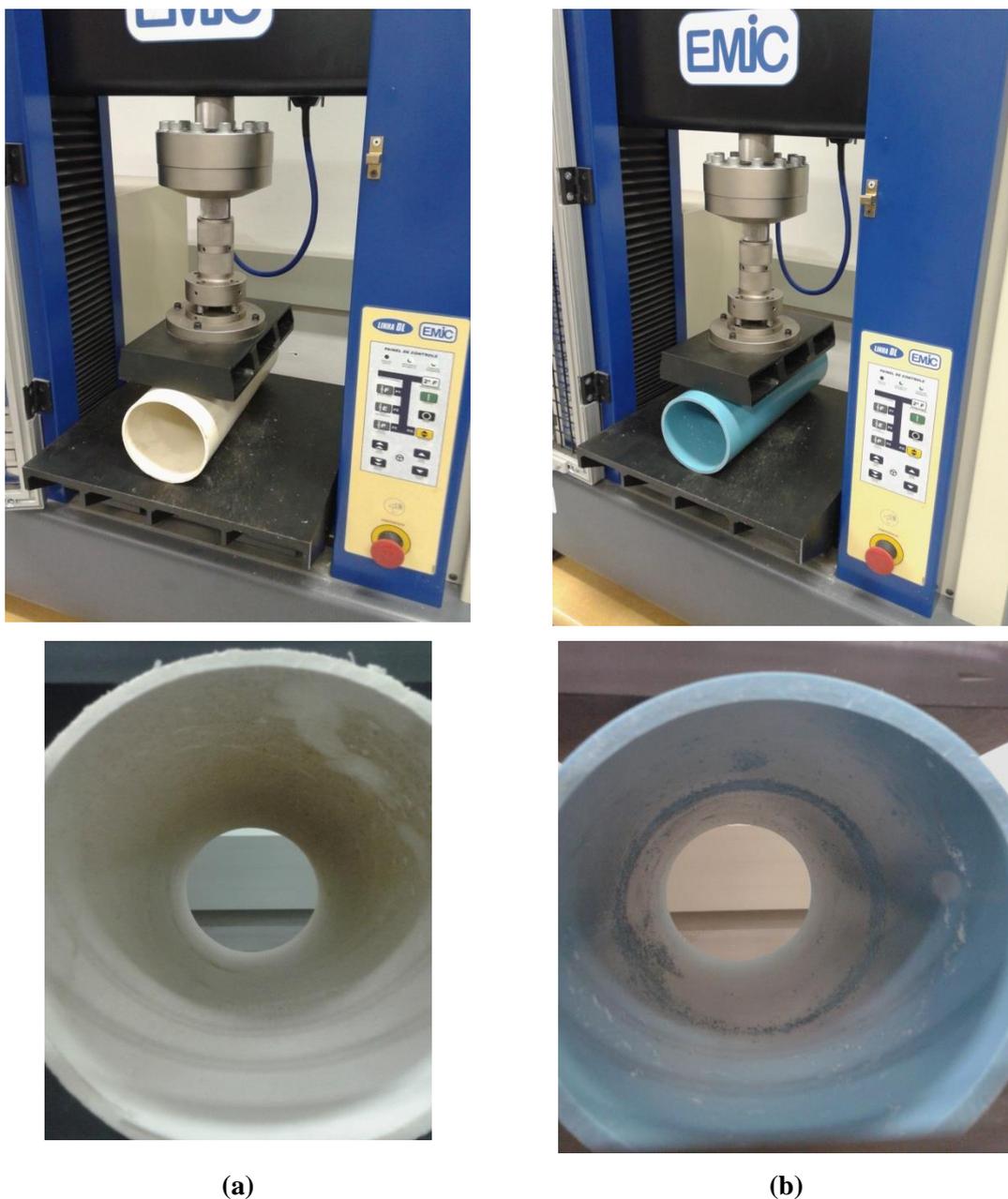


Figura 59. Realização do Ensaio de determinação da classe de rigidez e resistência ao achatamento:
(a) Tubos com Orientação Molecular; (b) Tubos sem Orientação Molecular (Mexichem, 2015).

5.2.7. Ensaio de Avaliação da Resistência ao Prolongamento da Fissura (Resistência do Anel C)

O objetivo deste Ensaio é verificar a resistência ao prolongamento de fissuras em tubos em PVC, com e sem orientação molecular, por meio da avaliação da superfície fraturada dos corpos de prova, no que diz respeito ao comportamento frágil ou dúctil, quando submetidos à aplicação de cargas dinâmicas pré-definidas.

5.2.7.1. Normas de referência e documentos complementares

- ABNT NBR 7665:2007 – Sistemas para adução e distribuição de água – Tubos de PVC 12 DEFOFO com junta elástica – Requisitos.
- ABNT NBR 15750:2009 – Tubulações de PVC-O (cloreto de polivinila não plastificado orientado) para sistemas de transporte de água ou esgoto sob pressão – Requisitos e métodos de ensaios.
- Instrução de Trabalho Mexichem ITR 0784 – Verificação da Resistência ao Anel C.

5.2.7.2. Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução do ensaio está listada na Tabela 21, juntamente com suas especificações técnicas:

Tabela 21. Aparelhagem necessária à execução do Ensaio de Avaliação da Resistência ao Prolongamento da Fissura (Resistência do Anel C).

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	Nº DE TOMBAMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Máquina pneumática para confecção de entalhe	0800139	BDM Equipamentos Industriais	AMAN-02	003-2003
Micrômetro externo Capacidade 0-25 mm Resolução 0.01 mm	41566	Digimess	-	-
Furadeira portátil	-	Bosch	GSB 14,4-2	203000004
Equipamento de teste C		LDI Automação Industrial		
Software	-	Engel		
Relógio Comparador	41776	Digimess	-	-

A aparelhagem para teste de Avaliação da Resistência ao Prolongamento da Fissura (Resistência do Anel C) é mostrada na Figura 60.

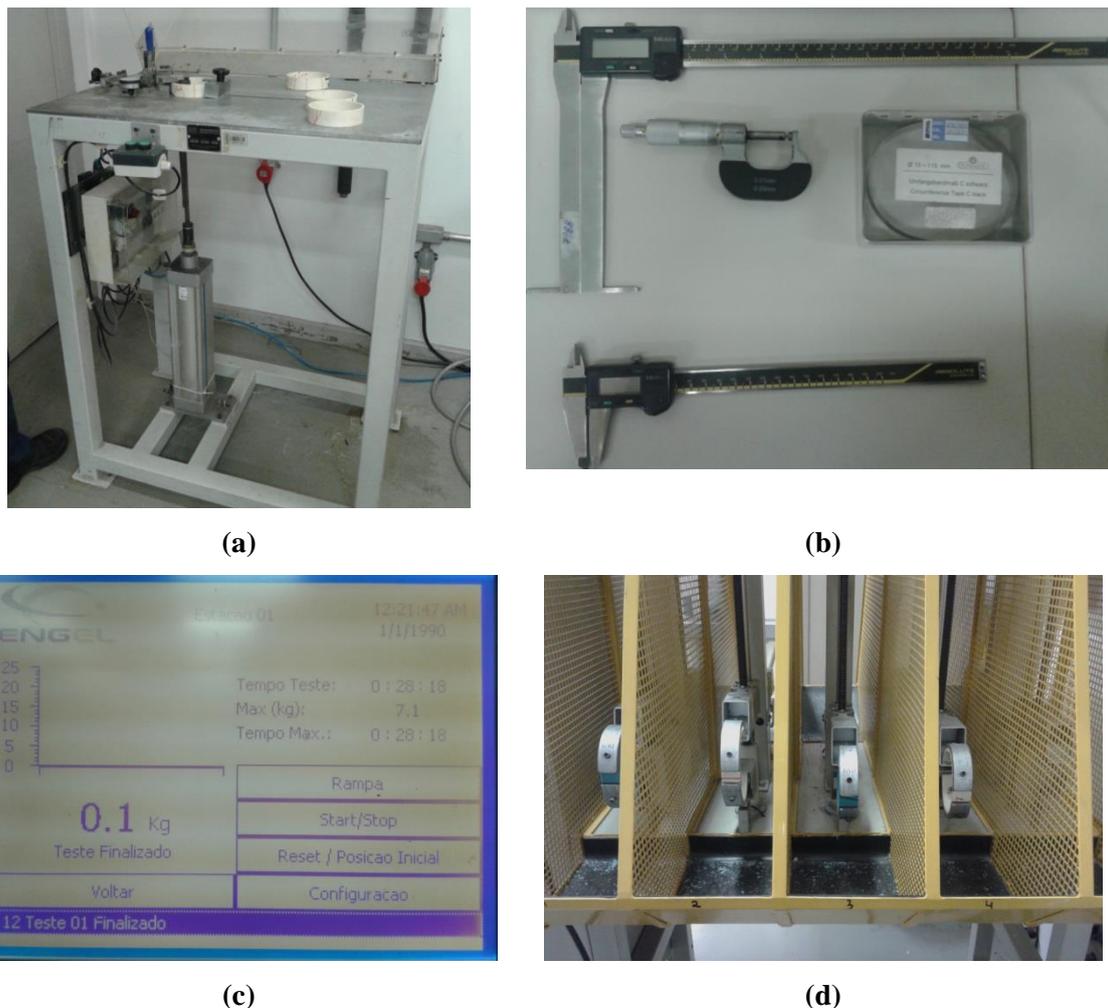


Figura 60. Aparelhagem para Ensaio de Avaliação da Resistência ao Prolongamento da Fissura (a) Máquina pneumática para confecção de entalhe; (b) Instrumentação utilizada; (c) Software para Equipamento de teste C; (d) Equipamento de teste C (Mexichem, 2015).

5.2.7.3. Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram obtidos a partir de segmentos de tubos, com as extremidades cortadas em esquadro, extraídos de tubos selecionados aleatoriamente da linha de produção, estando livres de rebarbas e sujeiras, com comprimentos indicados na Tabela 5.

De cada tubo foi extraído apenas um corpo de prova, onde foram tomados os segmentos dos tubos, onde serão confeccionados entalhes, com a finalidade de verificar o mecanismo de prolongamento da fissura nestes. Desta forma, foi determinado o ponto de menor espessura de parede, e então sendo traçada uma linha perpendicular ao corte, em cada corpo de prova. Posteriormente, cada corpo de prova foi cortado em quatro

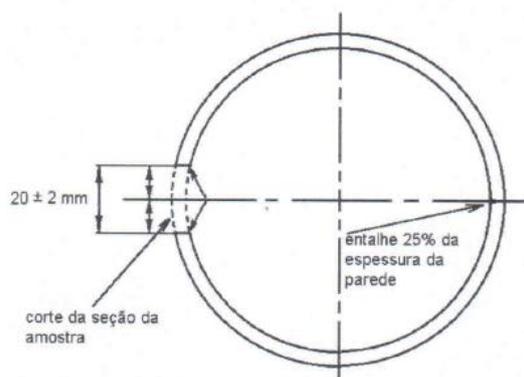
segmentos ou anéis, com largura de 30 milímetros cada, com extremidades perpendiculares ao eixo longitudinal do tubo, conforme mostrado na Figura 61.

Os anéis foram identificados com quatro ângulos internos (0° , 90° , 180° e 270°), sendo um dos anéis identificado com o ângulo de referência (0°), sendo este anotado no ponto de menor espessura. Foram traçadas mais três linhas, a partir dos pontos a 90° , 180° e 270° em relação ao ponto de menor espessura (0°), sendo assim identificadas as posições para confecção dos entalhes internos nos quatro anéis, conforme mostrado na Figura 61.



Figura 61. Preparação dos corpos de prova para o Ensaio de da Resistência ao Prolongamento da Fissura: (a) Corte das amostras em quatro segmentos; (b) Marcação dos ângulos (Mexichem, 2015).

Os anéis foram posicionados na Máquina pneumática para confecção de entalhe listada na Tabela 21, sendo estes entalhes dimensionados com o auxílio do relógio Comparador também listado na Tabela 21, regulado pelo certificado de calibração números 001457, emitido pela Empresa Oficial Soluções Metrológicas, em 06/11/2014, com o intuito de garantir a confiabilidade da dimensão parametrizada (0,05 mm). Utilizando a ferramenta de corte da Máquina, foram confeccionados entalhes nas superfícies internas dos anéis, nos quatro pontos anteriormente identificados. Em cada anel foi confeccionado um entalhe com ângulo diferente, conforme mostrado na Figura 62.



(a)



(b)



(c)

(d)

Figura 62. Preparação dos corpos de prova para o Ensaio de da Resistência ao Prolongamento da Fissura: (a) Desenho esquemático da confecção do entalhe e corte; (b) Confecção de entalhes; (c) Entalhes confeccionados a 0° e 180°; (d) Entalhes confeccionados a 90° e 270° (Mexichem, 2015).

Nas paredes externas dos anéis, foram traçadas com ajuda de gabaritos duas retas paralelas à linha diametralmente oposta à linha de entalhe, com distância de 20 milímetros entre as duas, tendo como ponto médio a linha diametralmente oposta à linha de entalhe, conforme desenho esquemático mostrado na Figura 63, as quais servirão como marcação para corte, visando à colocação dos anéis no Equipamento de ensaio. Foram posicionadas presilhas metálicas nos anéis, de forma a manter uma das extremidades a uma distância de 10 milímetros da linha de entalhe, sendo posteriormente os conjuntos (anel e presilha metálica) fixados por meio de parafusos, conforme mostrado na Figura 63.

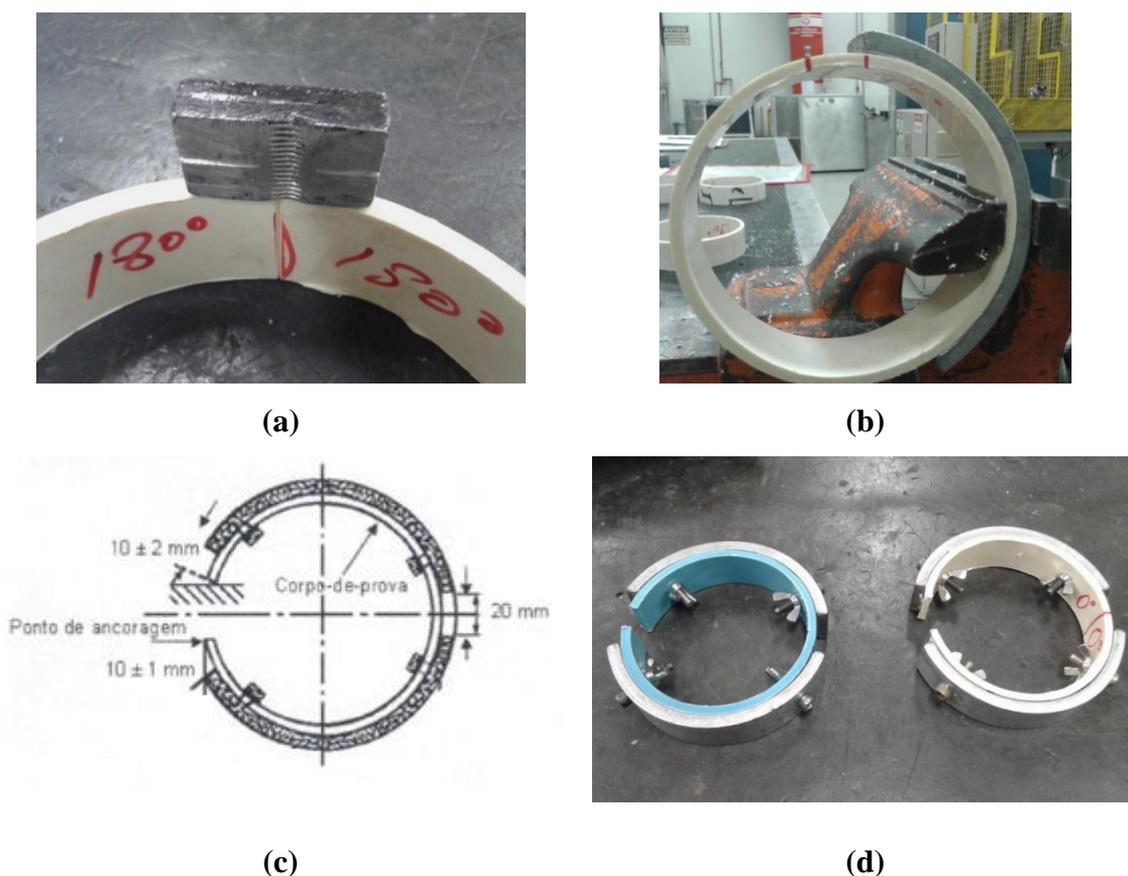


Figura 63. Montagem dos corpos de prova para o Ensaio de da Resistência ao Prolongamento da Fissura: (a) Posicionamento de gabarito para marcação de posicionamento das presilhas metálicas; (b) Posicionamento e fixação das presilhas metálicas; (c) Desenho esquemático da montagem dos conjuntos anéis-presilhas; (d) Montagem dos conjuntos anéis-presilhas (Mexichem, 2015).

5.2.7.4. Procedimento

Após a montagem dos conjuntos (corpos de prova em forma de anel – presilhas) foram identificados conforme listado na Tabela 22.

Tabela 22. Identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de da Resistência ao Prolongamento da Fissura.

Amostra	Ensaio	Nº Corpo de Prova		Identificação dos Corpos de Prova	
		PVC-U	PVC-O	PVC-U	PVC-O
7	7	1	5	1.7	5.7
		2	6	2.7	6.7
		3	7	3.7	7.7
		4	8	4.7	8.7

Foram selecionadas oito estações de trabalho no equipamento para a realização do Ensaio e inseridos todos os parâmetros do ensaio no Software Engel, o qual se comunica com o respectivo Equipamento de teste C, no que diz respeito ao tempo de teste e forças aplicadas nos corpos de prova, em quilogramas, conforme mostrado na Tabela 23.

Tabela 23. Inserção de parâmetros do Ensaio de da Resistência ao Prolongamento da Fissura no Software Engel.

Amostra	Corpo de Prova	Estação	Carga Inicial Aplicada (Kg)	Incremento de Carga (Kg)	Intervalo de Aplicação de Incremento de carga (minutos)
7	1.7	1	2,0	0,1	05
	2.7	3	2,0	0,1	05
	3.7	5	2,0	0,1	05
	4.7	8	2,0	0,1	05
	5.7	2	2,0	0,1	05
	6.7	4	2,0	0,1	05
	7.7	6	2,0	0,1	05
	8.7	9	2,0	0,1	05

Em seguida, os corpos de prova foram presos entre os suportes para carga localizados nas estações do Equipamento, de forma os mesmos não estarem submetidos a nenhuma carga. Por fim, inicia-se o ensaio, sendo aplicadas cargas dinâmicas de dobramento aos corpos de prova, acrescentando-se incrementos, em tempos pré-definidos, de forma a acompanhar pontual e graficamente os parâmetros listados na Tabela 23, isoladamente em cada estação, verificando assim as resistências ao prolongamento de fissura, até os possíveis rompimentos dos mesmos. O Ensaio é encerrado em cada estação, isoladamente, após o rompimento do respectivo corpo de prova inserido na mesma, conforme mostrado na Figura 64.

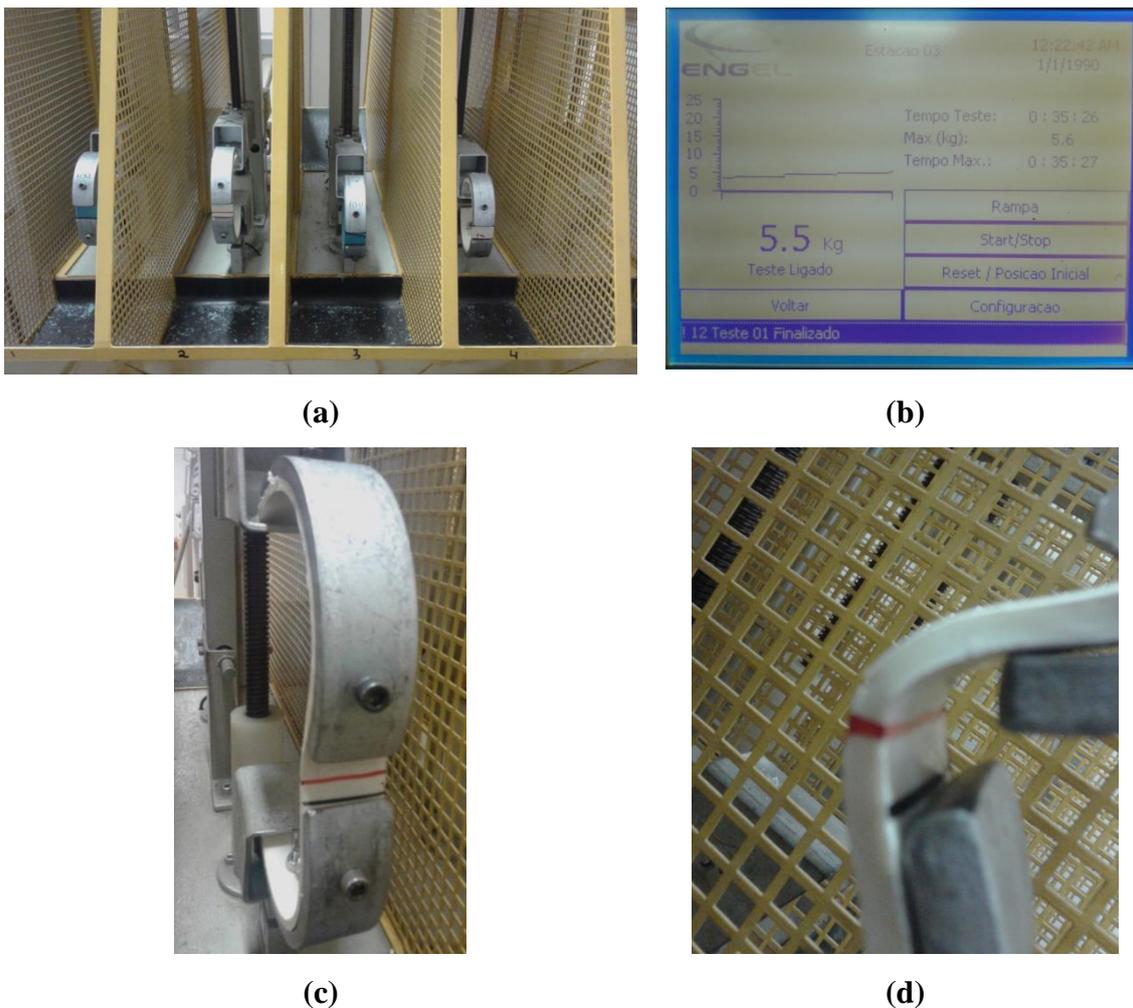


Figura 64. Realização do Ensaio de da Resistência ao Prolongamento da Fissura: (a) Posicionamento e montagem dos conjuntos no Equipamento; (b) Tela de acompanhamento de parâmetros; (c) Aplicação de carga dinâmica de dobramento em corpo de prova; (d) Resposta de corpos de prova em relação à carga dinâmica de dobramento aplicada (Mexichem, 2015).

5.2.8. Ensaio de Verificação do Grau de Orientação Molecular

O objetivo deste Ensaio é verificar os graus de orientação axial e circunferencial gerados a partir do processo de fabricação, em tubos em PVC com orientação molecular, quando submetidos a temperaturas pré-definidas, de forma a possibilitar o seu retorno à forma original (pré-forma).

5.2.8.1. Normas de referência e documentos complementares

- ABNT NBR 15750:2009 – Tubulações de PVC-O (cloreto de polivinila não plastificado orientado) para sistemas de transporte de água ou esgoto sob pressão – Requisitos e métodos de ensaios.
- Instrução de Trabalho Mexichem ITR 0461 – Ensaio de Grau de Orientação.

5.2.8.2. Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução do ensaio está listada na Tabela 24, juntamente com suas especificações técnicas:

Tabela 24. Aparelhagem necessária à execução do Ensaio de Verificação do Grau de Orientação Molecular.

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	Nº DE TOMBAMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Paquímetro Digital Capacidade 200mm Resolução 0.01 mm	40660	Mitutoyo	CDL-20CP	012121
Paquímetro Digital Capacidade 300mm Resolução 0.01 mm	40266	Mitutoyo		40266
Circômetro Capacidade 15 - 115 mm	41810	Schwenk	C115	
Gabarito para marcação de corpos de prova	-	-	-	-
Estufa microprocessada	0800443	Quimis	Q134M292	1307095

A aparelhagem para teste de Verificação do Grau de Orientação Molecular é mostrada na Figura 65.

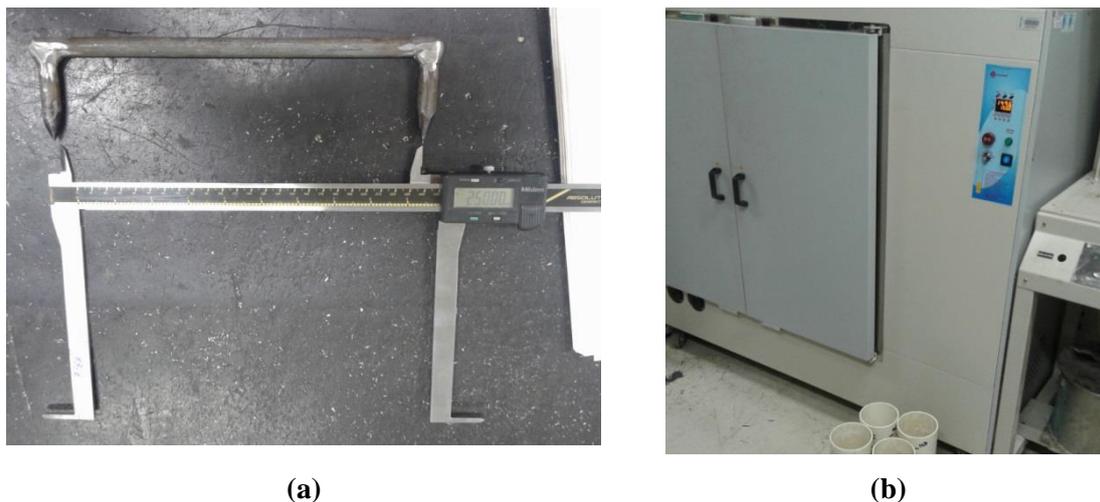


Figura 65. Aparelhagem para teste de verificação Grau de Orientação Molecular: (a) Gabarito para marcação de corpos de prova e Paquímetro Digital Capacidade 300mm Resolução 0.01 mm; (b) Estufa microprocessada (Mexichem, 2015).

5.2.8.3. Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram obtidos a partir de segmentos de tubos, com as extremidades cortadas em esquadro, extraídos de tubos selecionados aleatoriamente da linha de produção, estando livres de rebarbas e sujeiras, com comprimentos indicados na Tabela 5, sendo identificados conforme listado na Tabela 25.

Tabela 25. Identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação do Grau de Orientação Molecular.

Amostra	Ensaio	Nº Corpo de Prova		Identificação dos Corpos de Prova	
		PVC-U	PVC-O	PVC-U	PVC-O
		-	5	-	5.8
8	8	-	6	-	6.8
		-	7	-	7.8
		-	8	-	8.8

De cada tubo foi extraído apenas um corpo de prova, sendo conferidas todas as suas dimensões, também sendo traçadas sobre eles duas marcas circulares, em quatro posições diferentes, separadas entre si em 250 milímetros, de uma forma na qual uma das marcas ficasse a 20 milímetros de uma das extremidades do corpo de prova. Todas as marcações foram confeccionadas por meio de gabarito, com as respectivas dimensões

entre as pontas conferidas com o Paquímetro Digital listado na Tabela 24, regulado pelo certificado de calibração número 116457, emitido pela Empresa Oficial Soluções Metrológicas, em 23/01/2015, com o intuito de garantir a confiabilidade da dimensão parametrizada no gabarito, conforme mostrado na Figura 66.

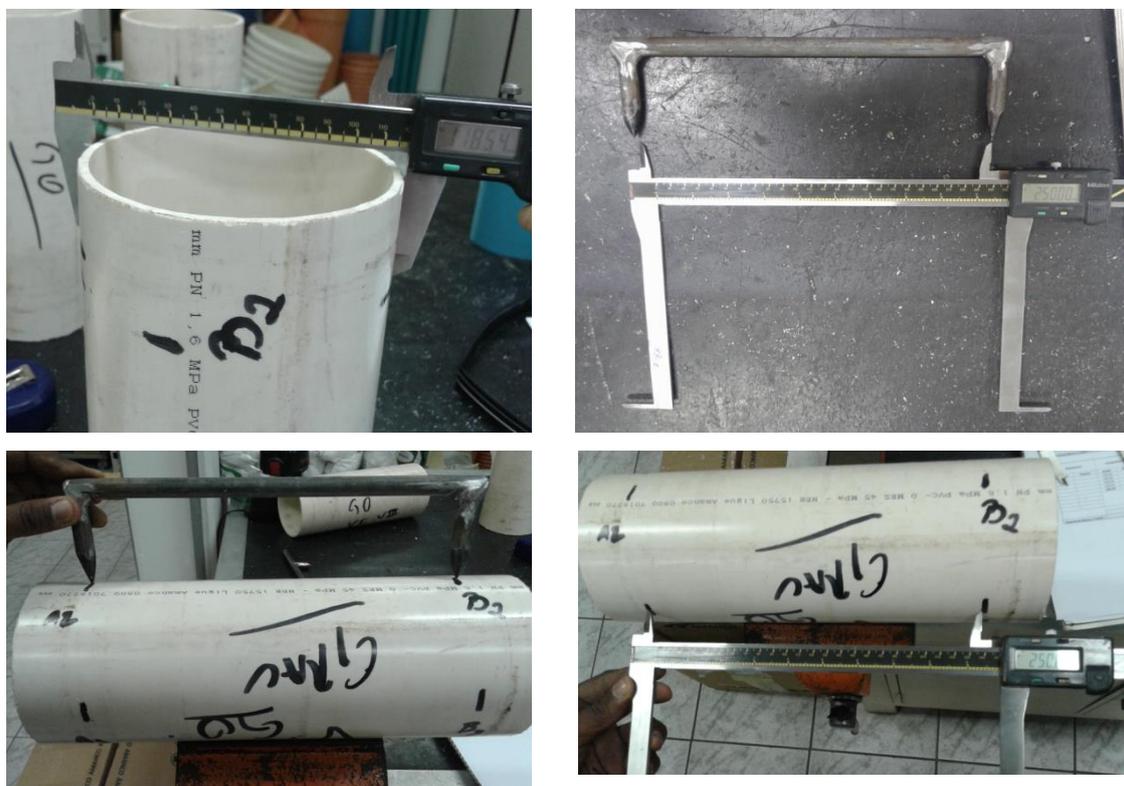


Figura 66. Medições de dimensões iniciais e finais e traçagem de marcações circulares nos corpos de prova utilizados no Ensaio de Grau de Orientação Molecular, traçadas com gabarito antes da execução do Ensaio (Mexichem, 2015).

Posteriormente, os corpos de prova foram condicionados em banho termoestabilizado durante 24 horas à temperatura de 20°C, sendo em seguida medidas as distâncias e os diâmetros entre as marcas circulares em quatro geratrizes equidistantes entre si, e calculadas as médias das quatro medições (L_i e D_i) para cada corpo de prova, com aproximação para o décimo de milésimo mais próximo, assim como as espessuras nos oito pontos de interseção entre a geratriz e as marcas circulares (e_i).

5.2.8.4. Procedimento

Primeiramente, foi regulado o termostato da estufa microprocessada listada na Tabela 24, regulada pelos certificados de calibração números 1435/13 e 1434/13, emitido pela Empresa Quimis, em 05/08/2013. Após a estabilização da temperatura em 150°C, os corpos de prova foram colocados na estufa, na posição vertical, de forma que não entrem em contato entre si ou com as paredes, durante uma hora, conforme mostrado na Figura 67.



Figura 67. Inserção dos Corpos de prova utilizados no Ensaio de Grau de Orientação Molecular em estufa microprocessada (Mexichem, 2015).

Em seguida, os corpos de prova foram retirados da estufa, sendo resfriados, na posição vertical, por uma hora, à temperatura ambiente (20°C).

Por fim, foram medidas as distâncias entre as marcas circulares e os diâmetros em quatro geratrizes equidistantes entre si e calculada a média das quatro medições (L_f e D_f), assim como as espessuras nos oito pontos de interseção entre a geratriz e as marcas circulares (e_f), para cada corpo de prova, com aproximação para o décimo de milésimo mais próximo, assim como todas as demais dimensões, conforme mostrado na Figura 68.

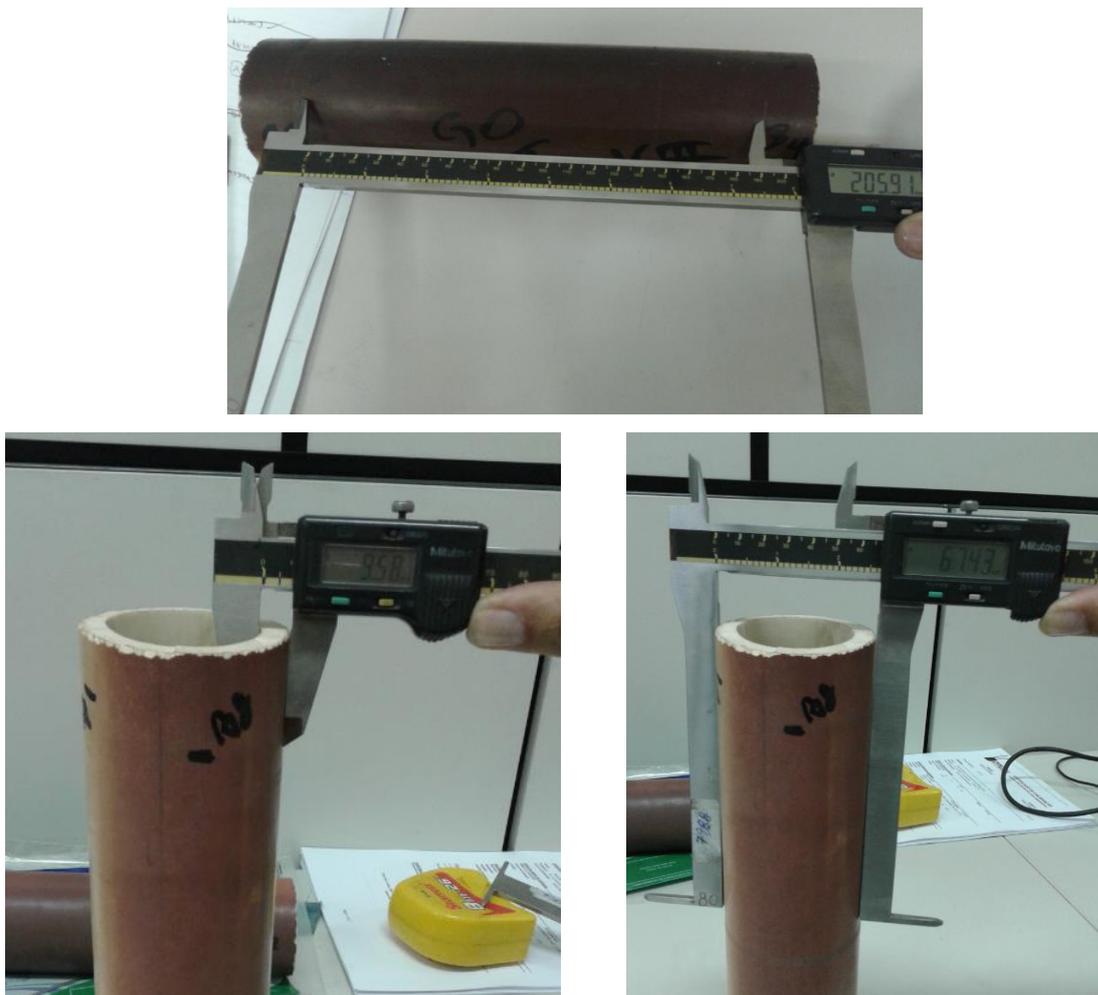


Figura 68. Conferência de dimensões e traçagem de marcações circulares nos corpos de prova utilizados no Ensaio de Grau de Orientação Molecular, traçadas com gabarito após a execução do Ensaio (Mexichem, 2015).

5.2.9. Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Pêndulo de Charpy

O objetivo deste Ensaio é verificar a resistência ao impacto de tubos em PVC, com e sem orientação molecular, quando submetido a uma certa carga de impacto, pela medição da quantidade de energia absorvida pelo material, durante a fratura.

5.2.9.1. Normas de referência e documentos complementares

- ABNT NBR 13607:1996 – Tubos de revestimento em PVC para poços profundos – Verificação da flexão ao impacto.
- Instrução de Trabalho Mexichem ITR 0803 – Resistência ao Impacto Charpy.

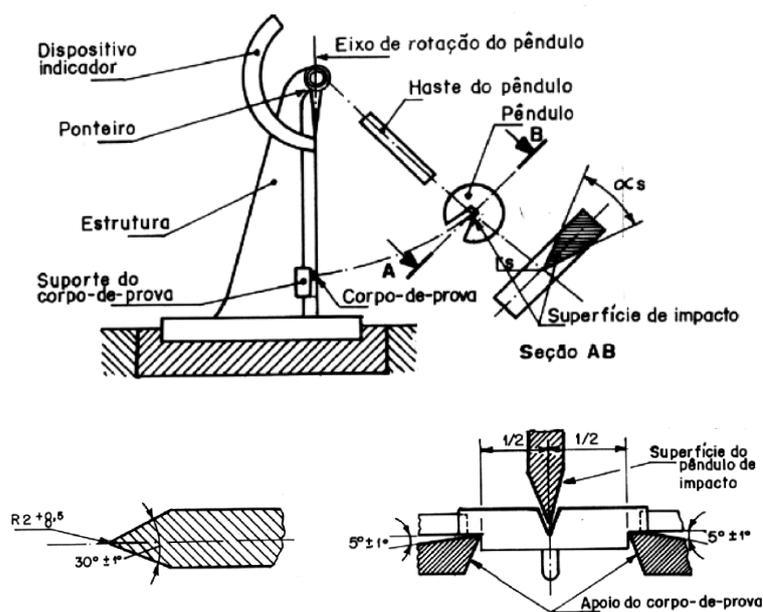
5.2.9.2. Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução do ensaio está listada na Tabela 26, juntamente com suas especificações técnicas:

Tabela 26. Aparelhagem necessária à execução do Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Pêndulo de Charpy.

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	Nº DE TOMBAMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Equipamento para teste de impacto com pêndulo de Charpy	0800045	Zwick	-	-
Paquímetro Digital Capacidade 200mm Resolução 0.01 mm	40660	Mitutoyo	CDL-20CP	012121
Paquímetro Digital Capacidade 300mm Resolução 0.01 mm	40266	Mitutoyo	-	40266
Serra de corte	-	-	-	-

O Equipamento para teste de impacto com Pêndulo de Charpy, contempla uma base metálica com massa cerca de quarenta vezes maior do que a massa do pêndulo de impacto; uma superfície de impacto do pêndulo com ângulo interno de 30° e arredondada, com raio de 2,0 mm e um Suporte do corpo-de-prova constituído por dois blocos lisos, rigidamente montados, de forma que o eixo longitudinal de um corpo de prova retangular seja horizontal, e com face que sofre o impacto seja paralela à borda da superfície de impacto do pêndulo, conforme mostrado na Figura 69.



(a)



(b)

Figura 69. Equipamento para teste de impacto com Pêndulo de Charpy: (a) Desenho esquemático; (b) Equipamento em Laboratório ((a) Adaptado da Norma ABNT NBR 13607, 1996); (b) Mexichem, 2015).

5.2.9.3. Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram obtidos a partir de segmentos de tubos, cortados de forma retangular, com 50,80 milímetros de comprimento médio, 8,65 milímetros de largura média e 5,00 milímetros de espessura média, estando livres de riscos visíveis, ondulações, poros, marcas profundas e outras imperfeições, com acabamentos lisos, com pares de superfícies paralelas mutuamente perpendiculares. De cada tubo foi extraído apenas um corpo de prova, conforme mostrado na Figura 70, sendo identificados conforme a Tabela 27.



Figura 70. Separação e identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Pêndulo Charpy (Mexichem, 2015).

Tabela 27. Identificação dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Pêndulo Charpy.

Amostra	Ensaio	Nº Corpo de Prova		Identificação dos Corpos de Prova	
		PVC-U	PVC-O	PVC-U	PVC-O
1	9	1	5	1.9	5.9
		2	6	2.9	6.9
		3	7	3.9	7.9
		4	8	4.9	8.9

As dimensões dos corpos de prova relativas aos comprimentos, larguras e espessuras foram conferidas com os Paquímetros Digitais listados na Tabela 26, conforme mostrado na Figura 71.

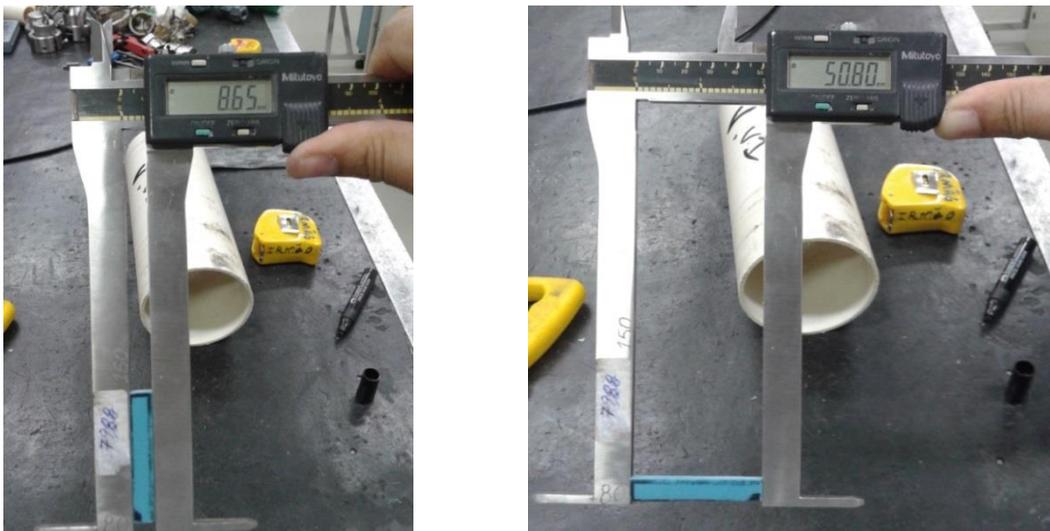


Figura 71. Conferência de dimensões dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Pêndulo Charpy (Mexichem, 2015).

5.2.9.4. Procedimento

Primeiramente foi executado um ensaio, sem corpo de prova posicionado no seu suporte, para verificar se as perdas por atrito e resistência do ar são inferiores a 0,5 % da energia potencial acumulada pelo pêndulo. Posteriormente, foi calibrada a abertura dos suportes dos corpos de prova, conforme mostrado na Figura 72.

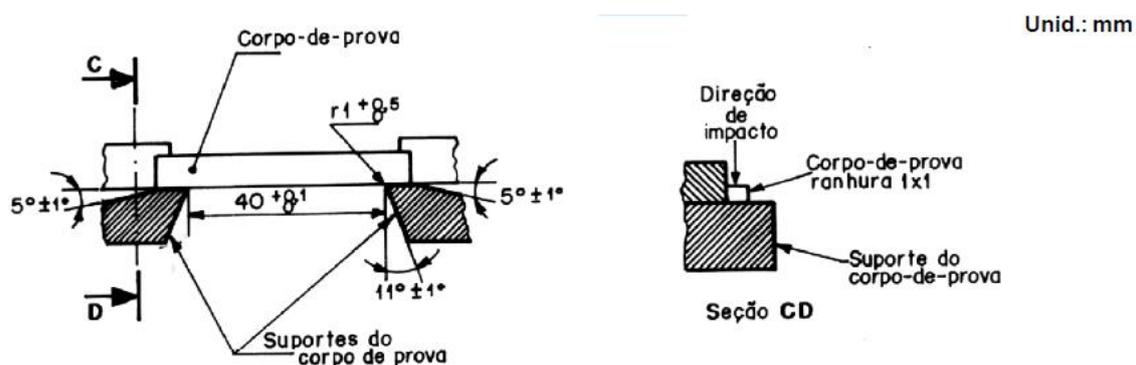


Figura 72. Visão esquemática da calibração da abertura dos suportes dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Pêndulo Charpy (Adaptado da Norma ABNT NBR 13607, 1996).

Em seguida, o pêndulo de impacto foi suspenso e preso na posição de ensaio, sendo colocados os corpos de prova sobre o suporte do equipamento, de modo a atingir os seus centros pela superfície de impacto do pêndulo. Por fim, foi liberada a trava,

sendo o pêndulo cuidadosamente solto da posição de ensaio, de forma a desferir o golpe, conforme mostrado na Figura 73.



(a)



(b)

Figura 73. Execução do Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Pêndulo Charpy:
(a) Posicionamento dos corpos de prova; (b) Liberação do pêndulo de impacto para desferimento do golpe (Mexichem, 2015).

6. RESULTADOS

Nesta etapa serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos Ensaio executados nos corpos de prova em PVC com e sem orientação molecular, sendo apresentados na mesma sequência de execução dos mesmos.

6.1. Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Percursor Metálico

Os resultados do Ensaio de verificação da resistência ao impacto com percussor metálico foram obtidos a partir do cálculo da Energia potencial necessária para romper os corpos de prova utilizados. As Energias potenciais de impacto geradas são mostradas na Tabela 28.

Tabela 28. Energias potenciais geradas no Ensaio Verificação da Resistência ao Impacto com Percursor Metálico.

Diâmetro Nominal	PVC-O			PVC-U		
	Massa do Percussor (Kg)	Altura da Queda (m)	Energia Potencial (J)	Massa do Percussor (Kg)	Altura da Queda (m)	Energia Potencial (J)
100	6,3	2,0	123,60	6,3	2,0	123,60
	12,5	2,0	245,25	12,5	2,0	245,25

Diante das Energias potenciais geradas a partir das quedas dos percussores metálicos, foram verificadas, com o Paquímetro Digital listado na Tabela 6, as respectivas profundidades das depressões, conforme mostrado na Figura 74. Os resultados obtidos estão listados na Tabela 29 e Figuras 75 e 76, onde são verificadas também as reduções percentuais médias de espessura, respectivamente.

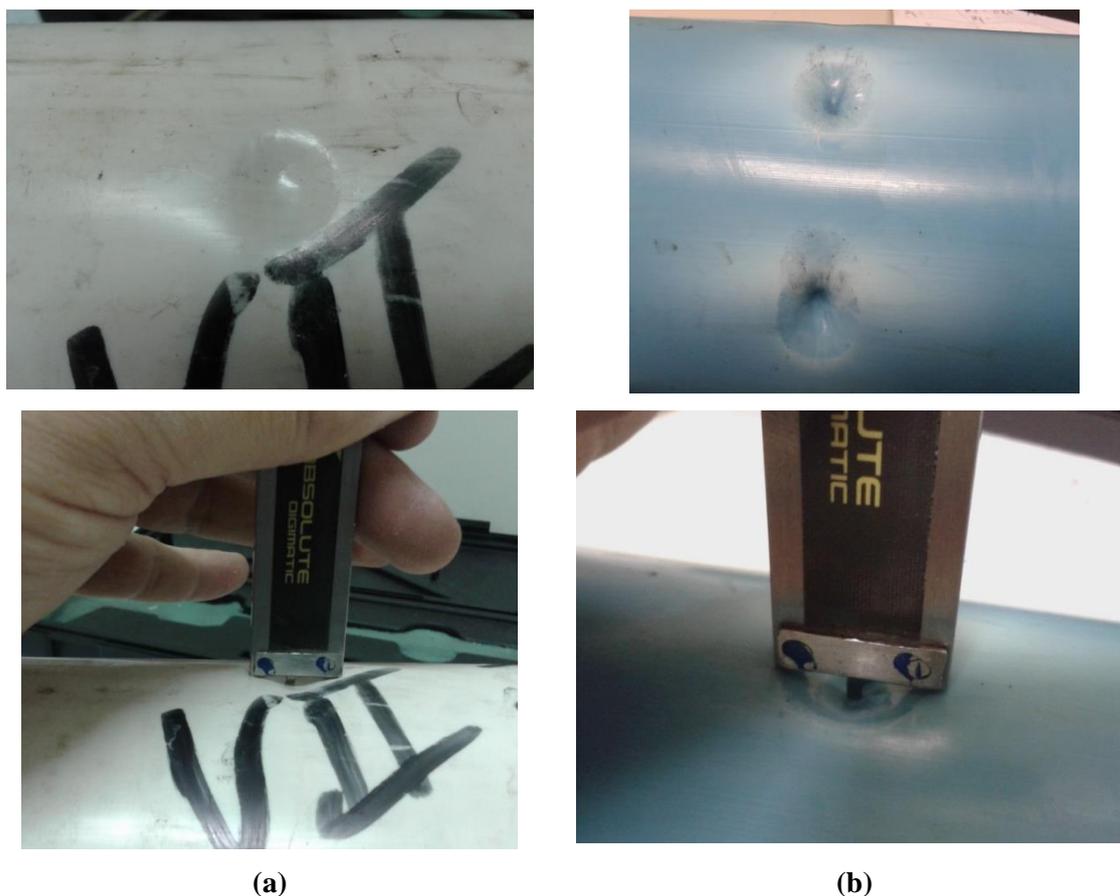


Figura 74. Avaliações das profundidades das depressões e reduções percentuais médias de espessura geradas a partir das quedas dos percussores metálicos: (a) Tubos com orientação molecular; (b) Tubos sem orientação molecular (Mexichem, 2015).

Tabela 29. Profundidades das depressões e reduções percentuais médias de espessura geradas a partir das quedas dos percussores metálicos.

Tipo de Tubo	PVC-U				PVC-O			
Massa do Percussor (Kg)	6,3	6,3	12,5	12,5	6,3	6,3	12,5	12,5
Corpo de Prova	1.1	2.1	3.1	4.1	5.1	6.1	7.1	8.1
Profundidades das Depressões (mm)	0,37	0,64	1,78	4,20	0,00	0,00	1,40	1,06
	0,40	0,82	1,36	5,33	0,00	0,00	0,64	1,59
	0,48	0,96	0,83	4,76	0,00	0,00	0,84	0,72
	0,31	0,26	1,01	6,07	0,00	0,00	0,92	1,05
	0,34	0,64	1,35	5,51	0,00	0,00	0,88	0,46
	0,24	0,76	1,76	5,03	0,00	0,00	0,85	0,57
Média das Profundidades das Depressões (mm)	0,35	0,68	1,34	5,15	0,00	0,00	0,92	0,90
Espessura média do Tubo (mm)	5,50				4,15			
Redução Percentual Média de Espessura (%)	6,36	12,36	24,36	93,64	0,00	0,00	22,17	21,69

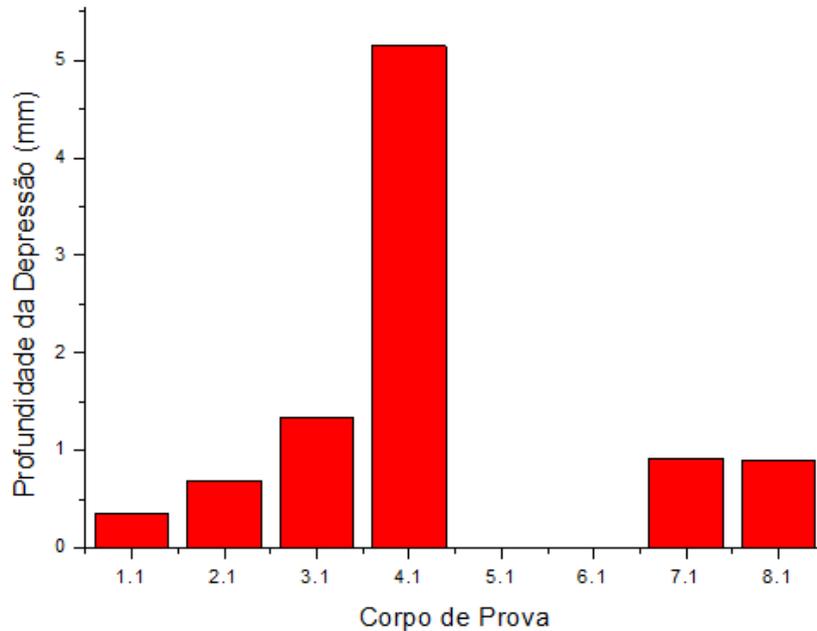


Figura 75. Profundidades das depressões geradas a partir das quedas dos percussores metálicos.

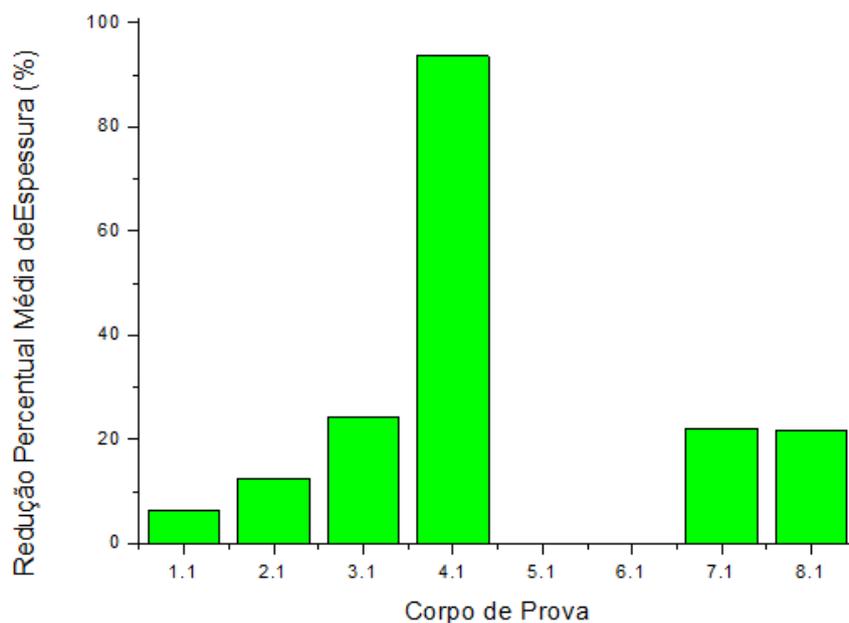


Figura 76. Reduções percentuais médias de espessura geradas a partir das quedas dos percussores metálicos.

Diante dos resultados apresentados na Tabela 29 e Figuras 75 e 76, podemos verificar que os corpos de prova extraídos de tubos com orientação molecular apresentaram menores níveis de profundidades das depressões diante das Energias potenciais geradas a partir das quedas dos percussores (cerca de 413%), assim como uma menor redução percentual média de espessura (cerca de 311%), refletindo em

maiores níveis de amortecimento ao impacto e resistência à perfuração. Os corpos de prova 5.1 e 6.1, oriundos de tubos com orientação molecular, não sofreram influência notável, mediante o impacto dos percussores. Já o corpo de prova 4.1, oriundo de um tubo sem orientação molecular, quase foi totalmente perfurado pelo percussor, indicando, além de uma maior fragilidade, um defeito de consolidação da sua estrutura, durante o processo de fabricação. Os demais corpos de prova, tanto oriundos de tubos com orientação molecular (7.1 e 8.1), quanto sem orientação molecular (1.1., 1.2. e 1.3.) apresentaram comportamentos semelhantes.

As cadeias estiradas perpendicularmente à direção de desenvolvimento da trinca têm suas extremidades ancoradas em regiões vizinhas ao eixo de propagação da fratura, dissipando a energia nessas regiões e aumentando a energia absorvida durante o impacto. Nas amostras não orientadas foi observado o desenvolvimento da trinca na direção dos caminhos de menor interação intermolecular.

Nas amostras orientadas, este mecanismo baseia-se na maior energia necessária para se penetrar o corpo de prova na direção da orientação do que na direção transversal à mesma, devido a maior interação intermolecular entre cadeias ao longo do eixo paralelo a orientação. Como não há grande interação entre as cadeias perpendicularmente à orientação, pode-se imaginar planos com menor energia de coesão, que se portam como barreiras à propagação da penetração por impacto ou mesmo da trinca, esta que acaba por caminhar por sobre esses planos (menor energia de fratura).

6.2. Ensaio de Verificação da Resistência à Pressão Hidrostática Interna

Os resultados do Ensaio de verificação da resistência à pressão hidrostática interna de curta duração foram obtidos a partir dos relatórios gerados pelo Equipamento de pressurização com regulador de pressão para teste de pressão hidrostática interna, a partir dos parâmetros inseridos no Software IPT Datalogging V4.0, quando os corpos de prova foram submetidos a rampas de carga hidráulica em tempos pré-definidos, até a fratura, conforme listado na Tabela 12.

Foram realizadas avaliações dos corpos de prova após as realizações dos ensaios quanto ao estado estrutural e mecânica da fratura, conforme mostrado na Figura 79.

6.2.1. Tubos sem Orientação Molecular

Diante das condições acima listadas, foram gerados os dados listados na Tabela 30, assim como na Figura 77, extraídos dos respectivos relatórios de verificação da resistência à pressão hidrostática interna de curta duração, constantes no Apêndice B.

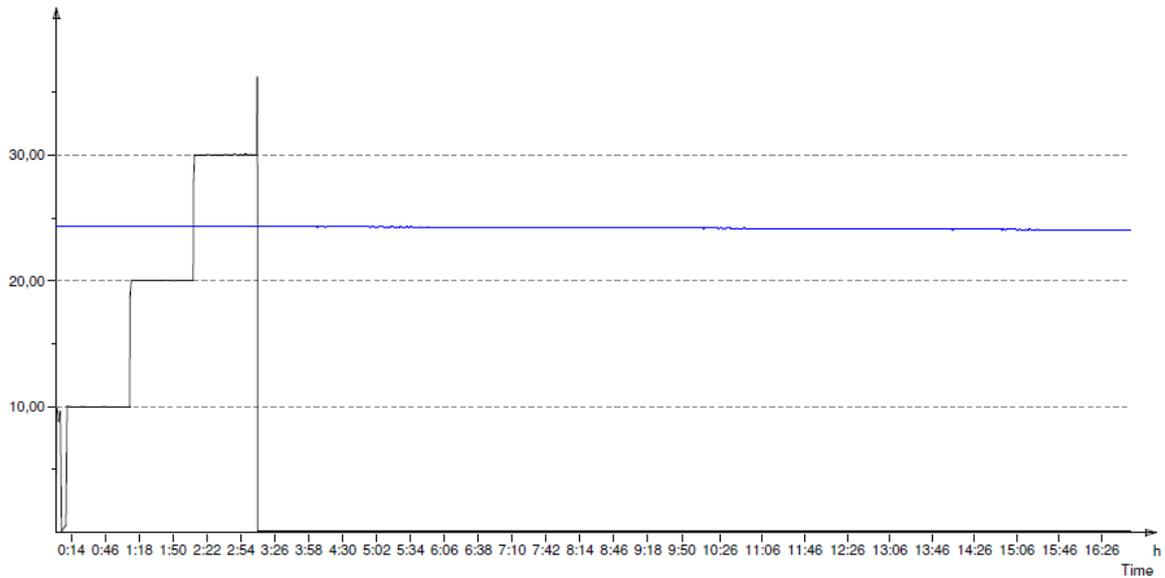
Tabela 30. Resultados do Ensaio de verificação da resistência à pressão hidrostática interna de curta duração para Corpos de Prova extraídos a partir de tubos sem orientação molecular.

Corpo de Prova	1.2						2.2					
Transição da Rampa	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
Tempo de Duração da Transição da Rampa (min)	10,0	60,0	60,0	60,0	0,0	-	0,00	60,0	60,0	60,0	0,0	-
Pressão Máxima Aplicada na Rampa (bar)	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0
Data / Hora Início do Ensaio	22/7/2015 - 13:52:14						22/7/2015 - 13:46:13					
Data / Hora Término do Ensaio	22/7/2015 - 17:02:12						23/7/2015 - 06:52:59					
Tempo de Duração Ensaio (min)	190,00						180,00					
Pressão de Ruptura (bar)	-	-	-	36,2	-	-	-	-	-	32,5	-	-

Linha 1: Pressão actual (0,10 bar ... 36,20 bar)
 Linha 2: Temp. Act. (24,00 °C ... 24,30 °C)
 Pressão alvo: 40,00 bar
 Cronómetro: 3,00 ih

|<- 22/7/2015 13:52:14

23/7/2015 06:45:33 ->|



Linha 1: Pressão actual (0,05 bar ... 32,52 bar)
 Linha 2: Temp. Act. (24,00 °C ... 24,30 °C)
 Pressão alvo: 40,00 bar
 Cronómetro: 3,00 ih

|<- 22/7/2015 13:46:13

23/7/2015 06:56:20 ->|

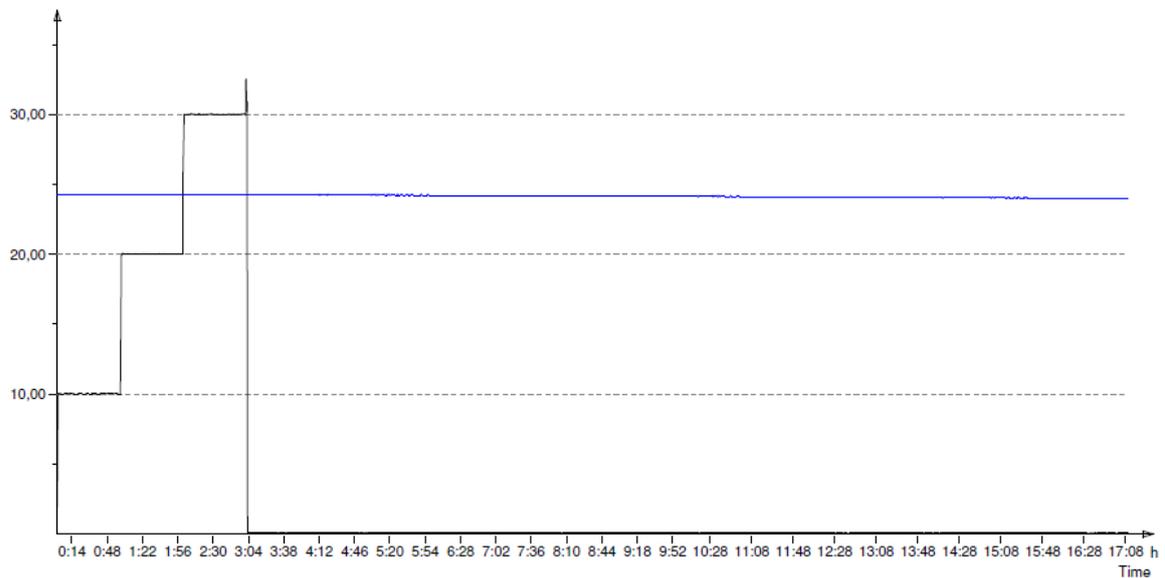
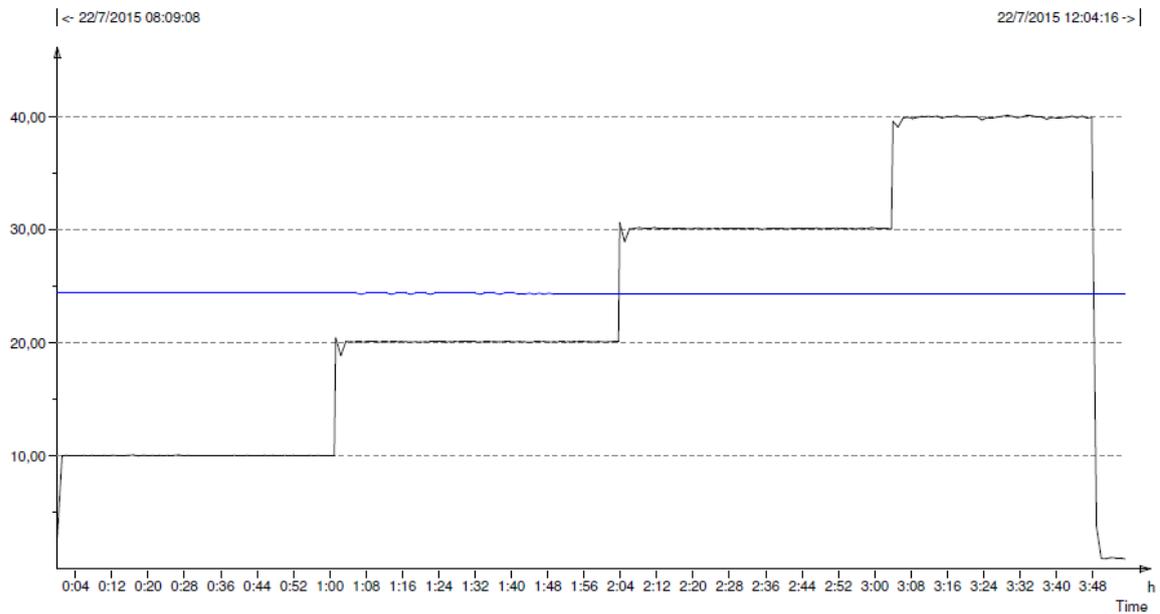


Figura 77. Gráficos de resultados do Ensaio de verificação da resistência à pressão hidrostática interna de curta duração para Corpos de Prova extraídos a partir de tubos sem orientação molecular, gerados pelo Software IPT Datalogging V4.0 (Adaptado da Tela de Relatório do Software IPT Datalogging V4.0, 2015).

Linha 1: Pressão actual (0,87 bar ... 40,15 bar)
 Linha 2: Temp. Act. (24,30 °C ... 24,40 °C)
 Pressão alvo: 40,00 bar
 Cronómetro: 3,72 ih



Linha 1: Pressão actual (0,02 bar ... 50,02 bar)
 Linha 2: Temp. Act. (24,00 °C ... 24,30 °C)
 Pressão alvo: 50,00 bar
 Cronómetro: 4,03 ih

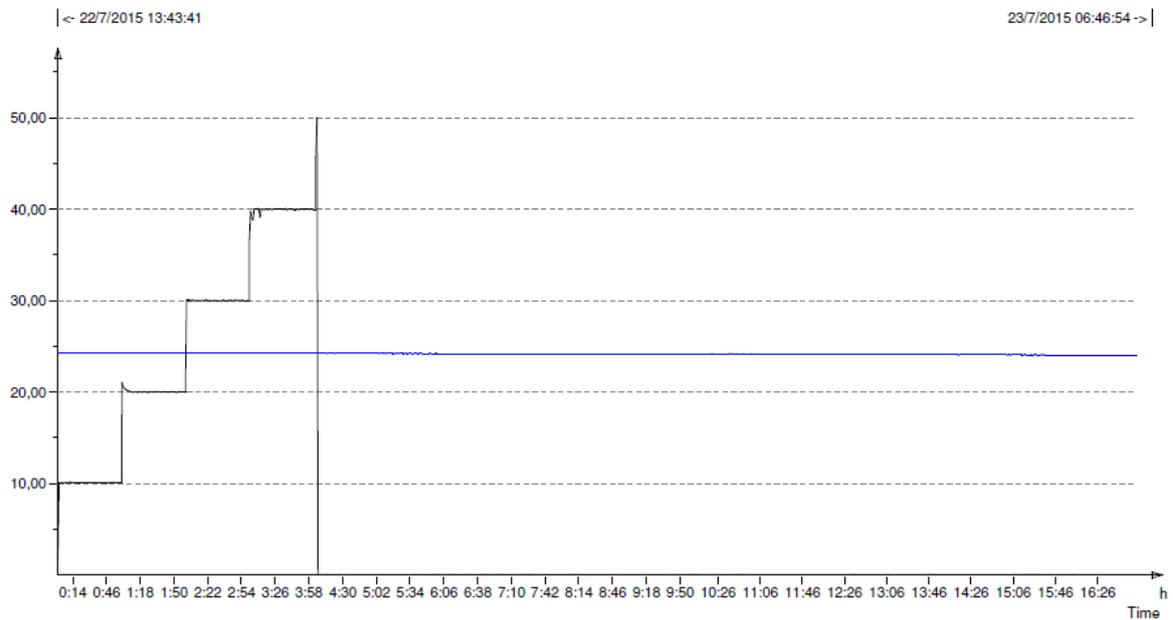


Figura 78. Gráficos de resultados do Ensaio de verificação da resistência à pressão hidrostática interna de curta duração para Corpos de Prova extraídos a partir de tubos com orientação molecular, gerados pelo Software IPT Datalogging V4.0 (Adaptado da Tela de Relatório do Software IPT Datalogging V4.0, 2015).

Diante dos resultados apresentados nas Tabelas 30 e 31 e Figuras 77 e 78, foram verificados maiores níveis de resistência à pressão hidrostática interna (cerca de 31%), durante maiores intervalos de tempo (cerca de 27%), nos corpos de prova extraídos de tubos com orientação molecular. São mostrados na Figura 79 os estados estruturais dos corpos de prova, quanto à ruptura, após a realização do Ensaio.



Figura 79. Avaliações dos corpos de prova após as realizações dos ensaios quanto ao estado estrutural e mecânica da fratura: (a) Tubos sem orientação molecular; (b) Tubos com orientação molecular.

6.3. Ensaio de Verificação da Resistência ao Cloreto de Metileno (Grau de Gelificação)

Os resultados do Ensaio de verificação da resistência ao cloreto de metileno (Grau de Gelificação) obtidos a partir da observação da homogeneidade das propriedades mecânicas e suas variações ao longo do comprimento do tubo, através da verificação da homogeneidade da gelificação, quando da avaliação resistência ao ataque químico, por cloreto de metileno.

Após o acondicionamento em estufa e resfriamento dos corpos de prova retirados dos tubos com orientação molecular, usinagem dos chanfros, imersão em cloreto de metileno e posterior retirada e secagem dos dois tipos de corpos de prova, foram identificados pontos de ataque somente nos corpos de prova extraídos de tubos sem orientação molecular, conforme mostrado na Figura 80.

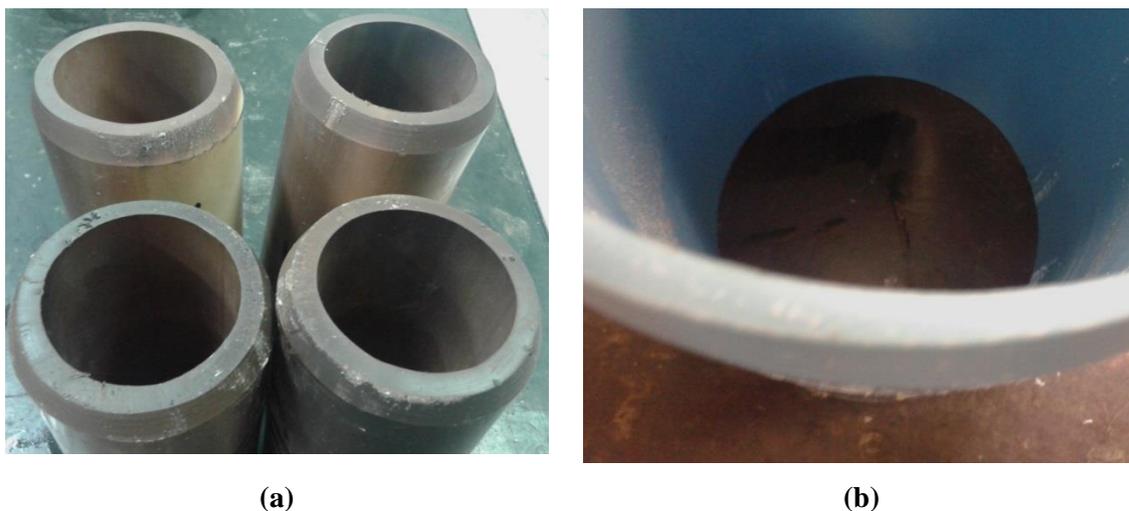


Figura 80. Verificação de pontos de ataque, após imersão dos corpos de prova em cloreto de metileno. (a) Tubos com Orientação Molecular; (b) Tubos sem Orientação Molecular (Mexichem, 2015).

6.4. Ensaio de Verificação da Resistência à Compressão Diametral

Os resultados do Ensaio de verificação da resistência à compressão diametral foram obtidos a partir dos relatórios gerados pela Máquina Universal de Ensaios Emic DL10000, a partir dos parâmetros inseridos no Software Emic Tesc Full 3.04, quando

os corpos de prova foram submetidos a cargas constantes, até o nível máximo de deformação pré-definido, conforme listado na Tabela 32 e nas Figuras 82 a 84.

Foi observada, com o achatamento total mantido, a ocorrência de trincas, rasgos, delaminações ou quebra dos corpos de prova. Quando aliviado o carregamento da prensa, os corpos de prova foram retirados e observados novamente nas superfícies interna e externa os aspectos quanto à ocorrência de trincas, rasgos, delaminações, deslocamento de paredes ou quebra.

Posteriormente, as dimensões relativas aos respectivos diâmetros externos conferidas novamente, agora com o Paquímetro Digital listado na Tabela 15, com o intuito de verificar os valores das relações entre diâmetros externos e espessuras, e conseqüentemente expressar os valores dos níveis de deflexão em porcentagem em relação ao diâmetro externo inicial (30, 55 e 80%), conforme mostrado na Figura 81.

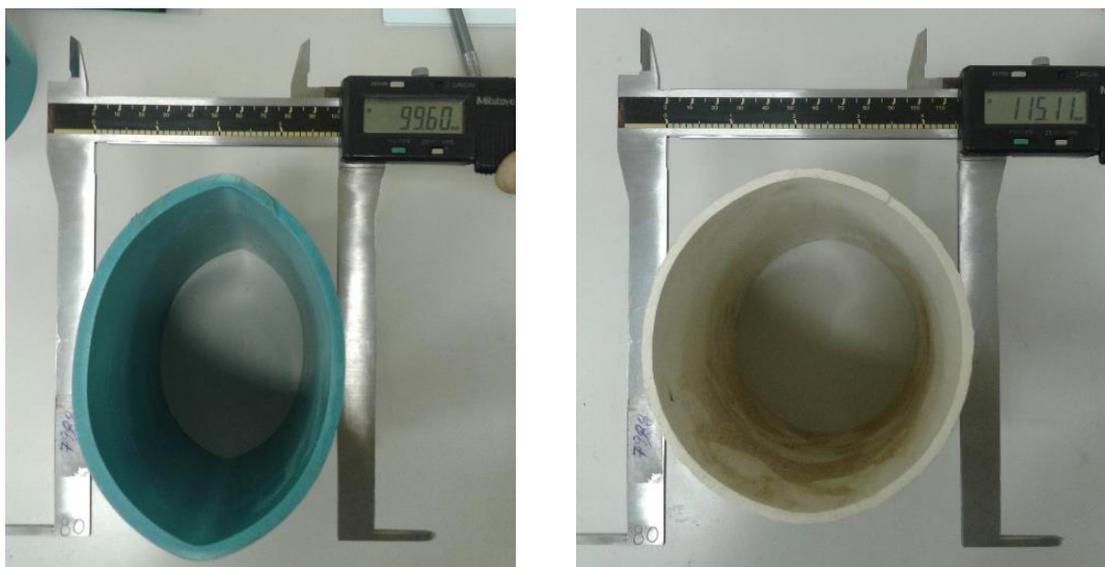


Figura 81. Reconferência de dimensões dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Verificação da Resistência à Compressão Diametral (Mexichem, 2015).

Diante das condições acima listadas, foram gerados os dados listados na Tabela 32, assim como na Figura 82, extraídos dos respectivos relatórios de verificação da resistência à compressão diametral, constantes no Apêndice C.

Tabela 32. Resultados do Ensaio de verificação da resistência à compressão diametral para Corpos de Prova extraídos a partir de tubos com e sem orientação molecular.

Tipo de Tubo	PVC-U			PVC-O		
	1.4	2.4	3.4	5.4	6.4	7.4
Corpo de Prova						
Força de Compressão Máxima Aplicada (N)	3600	3800	3650	2350	2200	2375
Achatamento residual (mm) para deflexões a 30 %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Deflexão residual (%) para carga de deflexão a 30 %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Achatamento residual (mm) para deflexões a 55 %	9,6	7,4	7,4	3,3	3,3	3,3
Deflexão residual (%) para carga de deflexão a 55 %	8,10	6,25	6,25	2,78	2,78	2,78
Achatamento residual (mm) para deflexões a 80 %	18,8	17,5	17,5	11,7	10,7	10,7
Deflexão residual (%) para carga de deflexão a 80 %	15,87	14,78	14,78	9,88	9,03	9,03
Área de Aplicação da Força de Compressão (mm ²)	95,03	95,03	95,03	54,10	54,10	54,10
Tensão de Compressão Máxima Aplicada (MPa)	37,88	39,98	38,40	43,43	40,66	43,90
Módulo de Elasticidade (MPa)		3000			4000	
Coeficiente de Poisson		0,40			0,45	
Pressão Crítica de Colapso Iminente (MPa)		270,47			319,97	

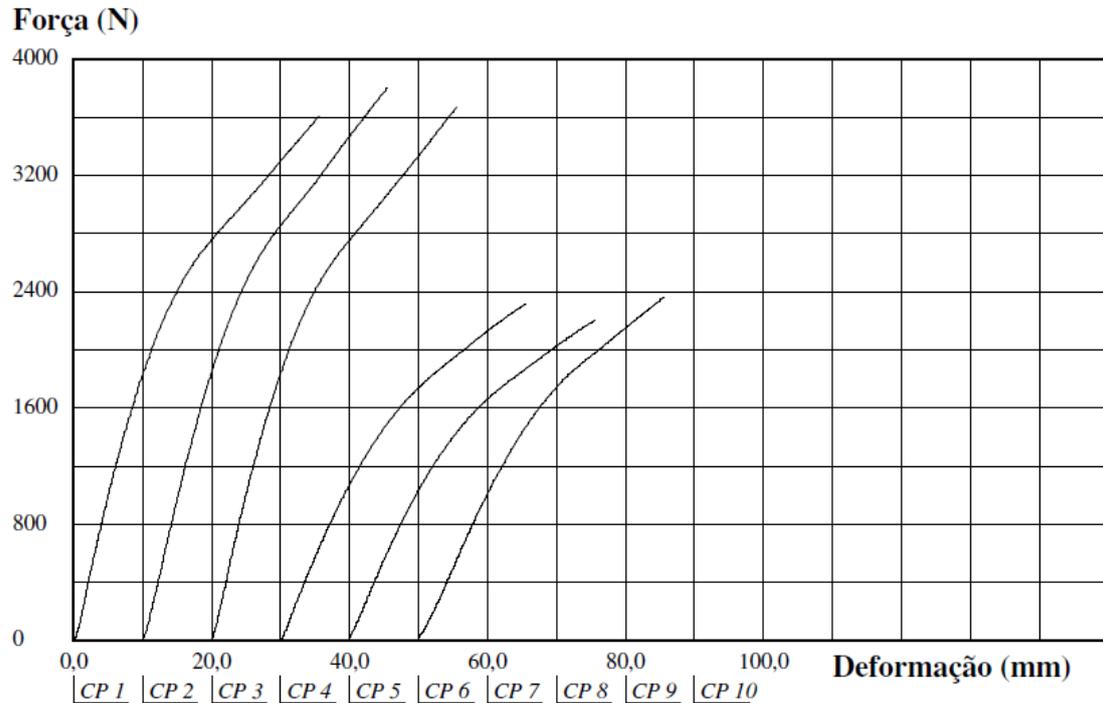


Figura 82. Gráficos de resultados do Ensaio de verificação da à compressão diametral para Corpos de Prova extraídos a partir de tubos com e sem orientação molecular, gerados pelo Software Emic Tesc Full 3.04 (Adaptado da Tela de Relatório do Software Emic Tesc Full 3.04, 2015).

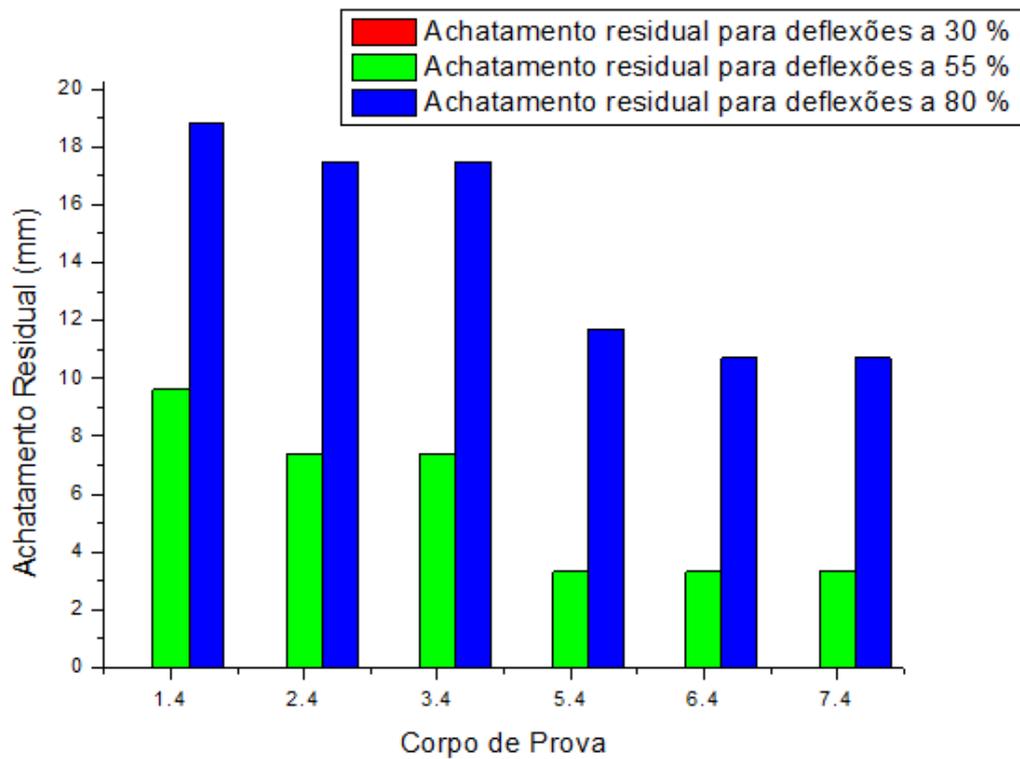


Figura 83. Achatamentos residuais causados por níveis de deflexões pré-definidos.

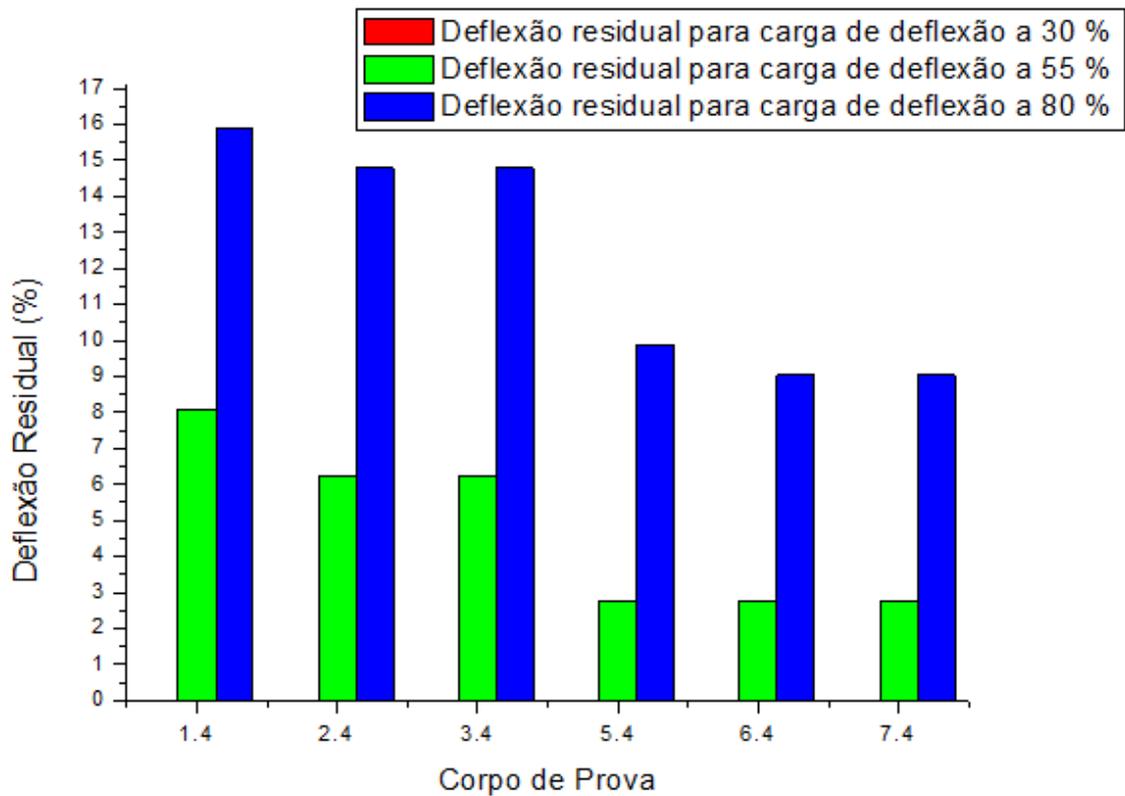


Figura 84. Deflexões residuais causadas por aplicações de cargas de deflexões pré-definidas.

Diante dos resultados listados na Tabela 32 e Figuras 82, 83 e 84, podemos verificar que os corpos de prova extraídos a partir de tubos com orientação molecular apresentaram menores níveis de achatamento residual para os mesmos níveis de deflexão aplicados (cerca de 81%), assim como maiores níveis de resistência à pressão crítica de colapso iminente (cerca de 18%).

6.5. Ensaio de Verificação da Estabilidade Dimensional

Os resultados do Ensaio de verificação da estabilidade dimensional foram obtidos a partir da quantificação da variação longitudinal máxima de tubos em PVC, com e sem orientação molecular, quando submetidos a variações de temperaturas pré-definidas. Os resultados são mostrados na Tabela 33 e nas Figuras 85 e 86.

Tabela 33. Resultados do Ensaio de verificação da estabilidade dimensional para Corpos de Prova extraídos a partir de tubos sem orientação molecular.

Corpo de Prova	Verificação Dimensional 1 (mm)	Verificação Dimensional 2 (mm)	Verificação Dimensional 3 (mm)	Verificação Dimensional 4 (mm)	Média das Verificações Dimensionais (mm)	Varição Dimensional (mm)	Varição Dimensional (%)
1.5	98,54	97,86	98,89	98,66	98,4875	1,5125	1,51
2.5	98,62	98,09	98,93	98,21	98,4625	1,5375	1,53
3.5	98,27	98,14	99,12	97,84	98,3425	1,6575	1,65
4.5	98,53	98,8	99,05	98,25	98,6575	1,3425	1,34
5.5	83,66	83,73	84,33	84,86	84,145	15,855	15,85
6.6	83,91	83,20	83,91	83,08	83,525	16,475	16,47
7.5	84,85	85,17	83,57	84,02	84,4025	15,5975	15,59
8.5	85,01	84,68	85,59	84,32	84,9	15,10	15,10

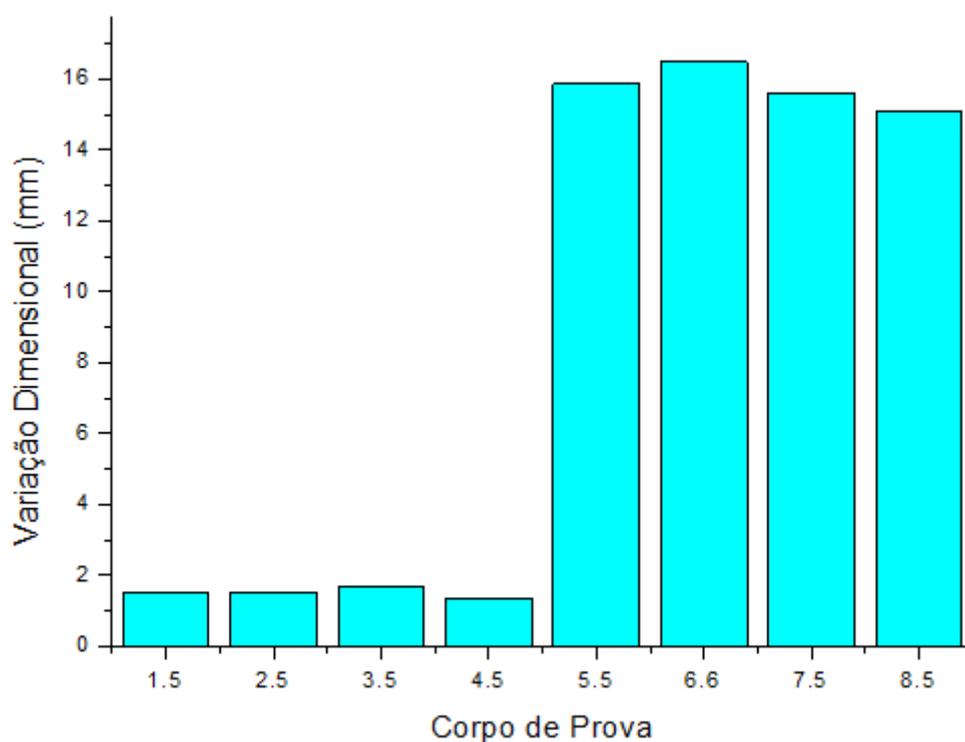


Figura 85. Quantificação da variação longitudinal em relação à configuração original.

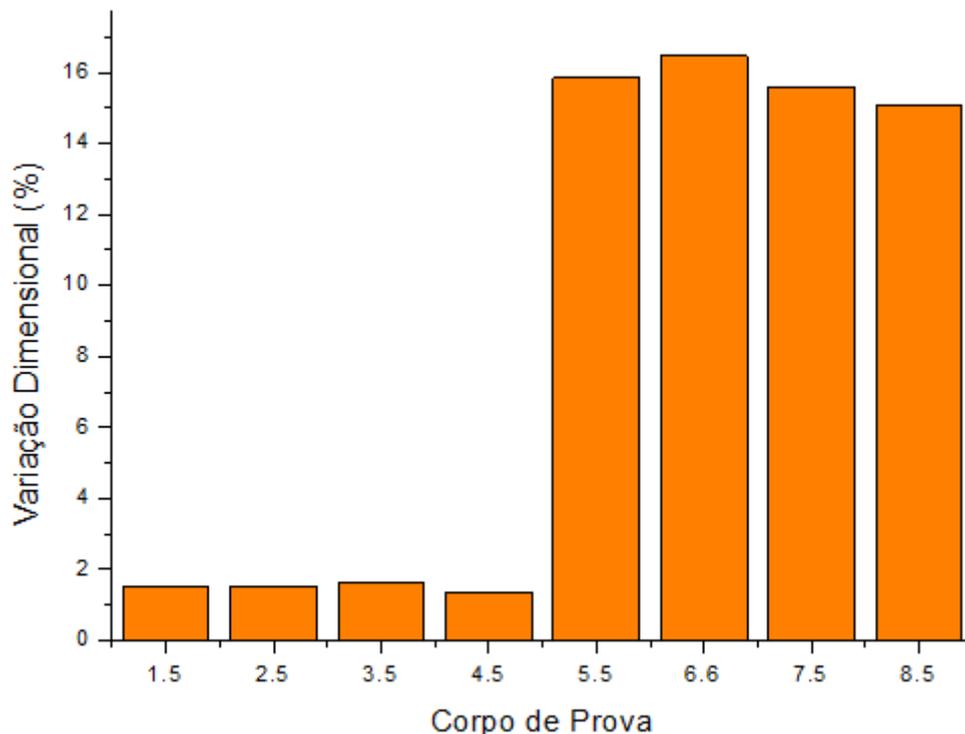


Figura 86. Variação longitudinal percentual em relação à configuração original.

Diante dos resultados listados na Tabela 33 e Figuras 85 e 86, podemos verificar que os corpos de prova extraídos a partir de tubos com orientação molecular apresentaram maiores níveis de variação dimensional, (cerca de 1000%), em virtude da perda destes níveis de orientação, quando da submissão a altas temperaturas.

6.6. Ensaio de Determinação da Classe de Rigidez e Resistência ao Achatamento

Os resultados do Ensaio de determinação da classe de rigidez e resistência ao achatamento foram obtidos a partir dos relatórios gerados pela Máquina Universal de Ensaios Emic DL10000, a partir dos parâmetros inseridos no Software Emic Tesc Full 3.04, quando os corpos de prova foram submetidos a cargas constantes, até o nível máximo de deflexão vertical pré-definido, conforme listado na Tabela 34 e nas Figuras 87 a 89.

Diante das condições acima listadas, foram gerados os dados listados na Tabela 34, assim como na Figura 87, extraídos dos respectivos relatórios de determinação da classe de rigidez e resistência ao achatamento, constantes no Apêndice D.

Tabela 34. Resultados do Ensaio de determinação da classe de rigidez e resistência ao achatamento para Corpos de Prova extraídos a partir de tubos com e sem orientação molecular.

Tipo de Tubo	PVC-U					PVC-O		
Corpo de Prova	1.6	2.6	3.6	4.6	5.6	6.6	7.6	8.6
Força de Compressão Máxima Aplicada (N)	1297,87	1291,11	1257,31	1331,67	679,35	716,53	669,21	716,53
Constante Elástica (N/m)	403673,78	400677,00	382305,13	406933,09	212162,14	216096,31	205549,69	216664,28
Deflexão Vertical a 3% (mm)	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27
Classe de Rigidez (Pa)	26037	25844	24659	26247	13684	13938	13258	13975

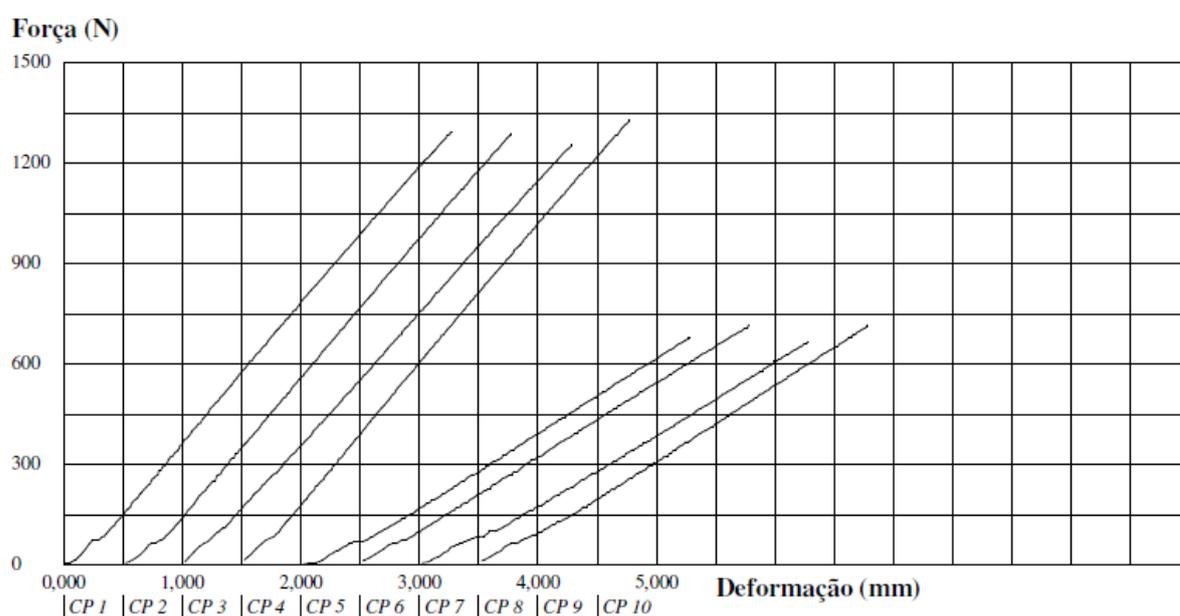


Figura 87. Gráficos de resultados do Ensaio de determinação da classe de rigidez e resistência ao achatamento para Corpos de Prova extraídos a partir de tubos com e sem orientação molecular, gerados pelo Software Emic Tesc Full 3.04 (Adaptado da Tela de Relatório do Software Emic Tesc Full 3.04, 2015).

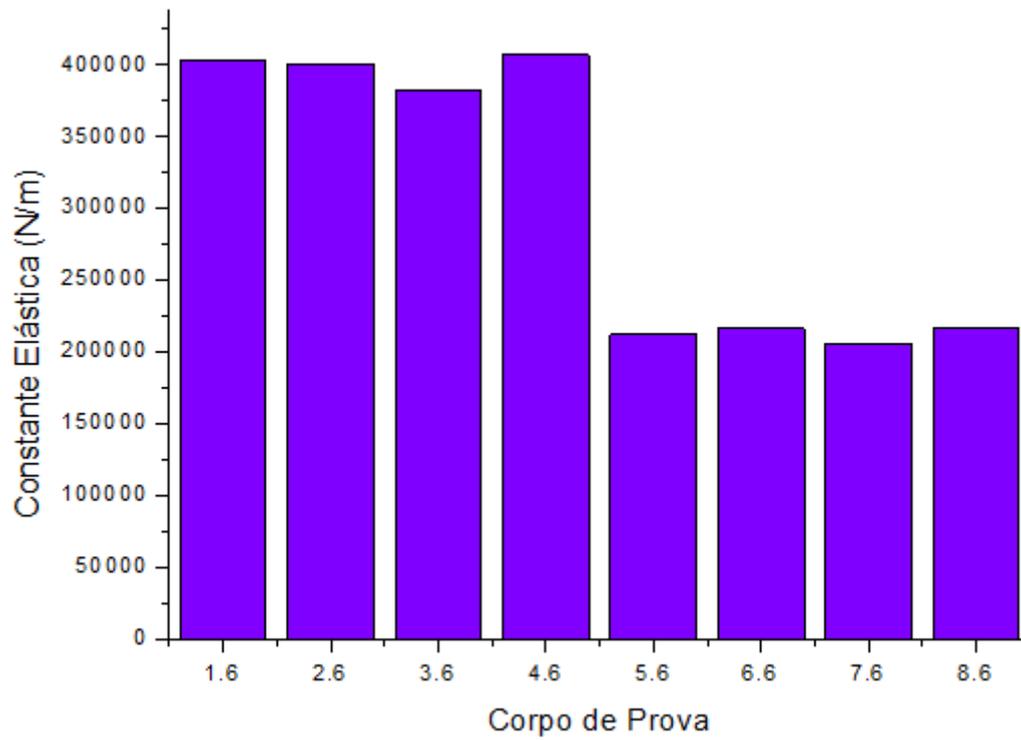


Figura 88. Quantificação das Constantes Elásticas.

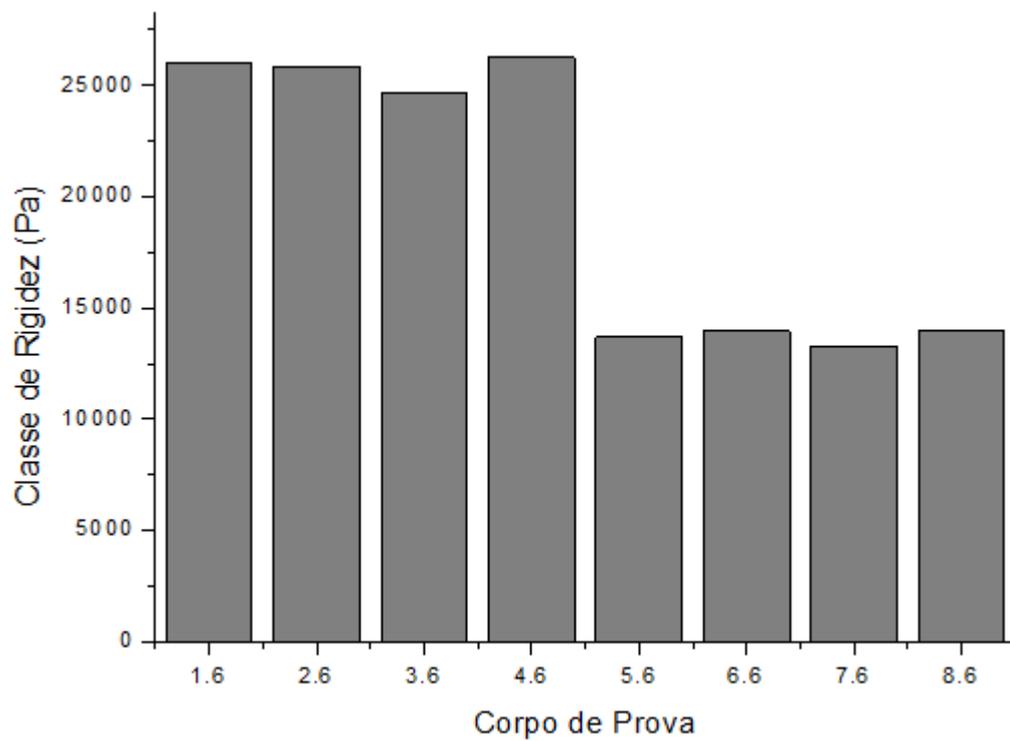


Figura 89. Quantificação das Classes de Rigidez.

Diante dos resultados listados na Tabela 34 e Figuras 87, 88 e 89, podemos verificar que os corpos de prova extraídos a partir de tubos com orientação molecular apresentaram menores constantes elásticas (cerca de 87%), e classes de rigidez (cerca de 87%), refletindo em maiores Módulos de Elasticidade e conseqüentemente em maiores níveis de deflexão suportados para os mesmos níveis de carga aplicados.

Foi observada, com o achatamento total mantido, a ocorrência de trincas, rasgos, delaminações ou quebra dos corpos de prova. Quando aliviado o carregamento do equipamento, os corpos de prova foram retirados e observados novamente nas superfícies interna e externa os aspectos quanto à ocorrência de trincas, rasgos, delaminações, deslocamento de paredes ou quebra.

6.7. Ensaio de Avaliação da Resistência ao Prolongamento da Fissura (Resistência do Anel C)

Os resultados do Ensaio de avaliação da resistência ao prolongamento da fissura (Resistência do Anel C) foram obtidos a partir dos dados apresentados pelo Software Engel, inserido no Equipamento de Teste C, quando os corpos de prova foram submetidos à aplicação de cargas dinâmicas pré-definidas, para posterior avaliação da superfície fraturada dos corpos de prova, no que se diz respeito ao comportamento frágil ou dúctil. Estes resultados estão listados na Tabela 35 e Figura 90.

Tabela 35. Resultados do Ensaio de Avaliação da Resistência ao Prolongamento da Fissura.

Tipo de Tubo	Corpo de Prova	Carga Máxima de Ensaio (Kg)	Tempo de Teste (horas / minutos)	Prolongamento de Fissura / Ruptura
PVC-U	1.7	7,10	00:28	Sim
	2.7	17,20	01:12	Sim
	3.7	6,10	00:44	Sim
	4.7	15,50	00:58	Sim
PVC-O	5.7	17,50	02:11	Não
	6.7	21,40	01:52	Não
	7.7	18,30	01:40	Não
	8.7	14,70	01:39	Não

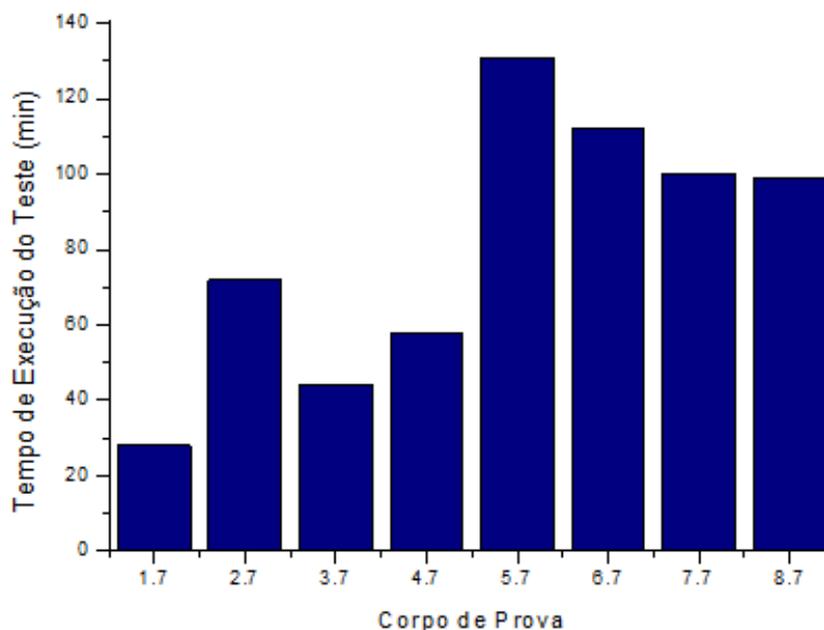


Figura 90. Tempo de execução do Ensaio de Avaliação da Resistência ao Prolongamento da Fissura.

Diante dos resultados listados na Tabela 35 e Figura 90, podemos verificar que os corpos de prova extraídos a partir de tubos com orientação molecular apresentaram maiores níveis de resistência a cargas dinâmicas (cerca de 56%), refletindo em maiores níveis de resistência ao prolongamento de fissuras, tendo em vista também a não ruptura destes corpos de prova.

Após o término do Ensaio foram verificados os processos de crescimento lento da fissura “craze”, assim como os aspectos das fraturas, de forma a obter melhor avaliação da qualidade da formulação e do processamento. Constata-se claramente a fratura na forma dúctil nos corpos de prova extraídos de tubos sem orientação molecular, enquanto que nos extraídos de tubos com orientação molecular observa-se a não propagação da fissura em virtude da formação das camadas laminares. Estas análises são mostradas na Figura 91.



Figura 91. Análises dos aspectos das fraturas após a realização do Ensaio de avaliação da resistência ao prolongamento da fissura: (a) Tubos sem orientação molecular; (b) Tubos com orientação molecular (Mexichem, 2015).

6.8. Ensaio de Verificação do Grau de Orientação

Os resultados do Ensaio de verificação do grau de orientação molecular foram obtidos a partir da quantificação dos graus de orientação axial e circunferencial gerados a partir do processo de fabricação de tubos em PVC, com orientação molecular, quando submetidos a variações de temperaturas pré-definidas. Os resultados são mostrados na Tabela 36 e Figuras 92 e 93.

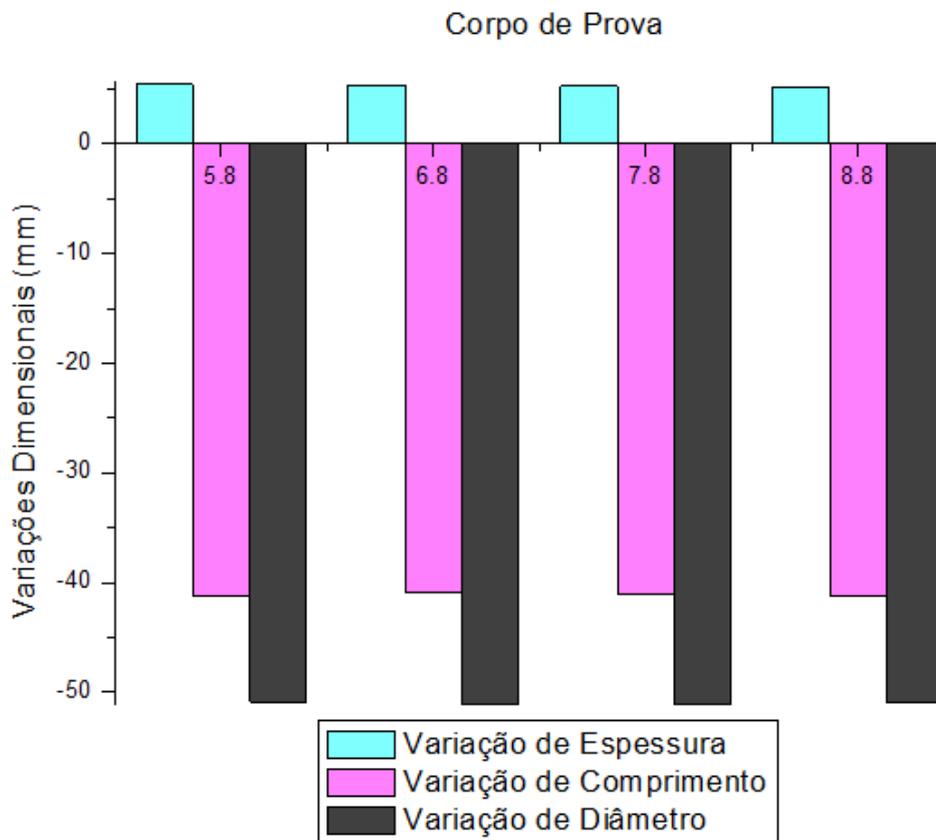


Figura 92. Variações Dimensionais após Ensaio Verificação do Grau de Orientação.

Tabela 36. Resultados do Ensaio de Verificação do Grau de Orientação.

Corpo de Prova	5.8	6.8	7.8	8.8
	3,91	3,99	3,94	3,92
	3,91	3,89	3,92	3,91
	3,94	3,78	3,87	3,91
Espessura Inicial (mm)	3,98	3,92	4,10	3,91
	3,96	3,90	3,92	3,99
	4,04	3,84	3,88	4,58
	3,98	4,10	4,16	3,92
	3,88	4,11	4,57	4,26
Espessura Inicial Média (mm)	3,95	3,94	4,04	4,05
	9,60	8,88	9,36	8,94
	9,42	9,24	9,00	9,56
	8,93	9,42	9,09	9,60
Espessura Final (mm)	9,61	9,62	9,54	8,93
	9,50	8,85	9,72	9,00
	9,28	9,25	8,95	9,37
	9,02	9,33	9,25	9,48
	9,53	9,67	9,60	8,93
Espessura Final Média (mm)	9,36	9,28	9,31	9,22
	250,00	250,00	250,00	250,00
Comprimento Inicial (mm)	250,00	250,00	250,00	250,00
	250,00	250,00	250,00	250,00
	250,00	250,00	250,00	250,00
	250,00	250,00	250,00	250,00
	209,00	209,15	209,00	209,55
Comprimento Final (mm)	209,01	209,36	209,05	208,82
	208,32	208,69	208,96	208,08
	209,06	209,03	208,63	209,01
	208,84	209,05	208,91	208,86
Comprimento Final Médio (mm)	208,84	209,05	208,91	208,86
	118,50	118,50	118,50	118,50
Diâmetro Inicial (mm)	118,50	118,50	118,50	118,50
	118,50	118,50	118,50	118,50
	67,80	67,45	67,50	67,55
Diâmetro Final (mm)	67,50	67,45	67,45	67,50
	67,50	67,45	67,45	67,50
Diâmetro Final Médio (mm)	67,65	67,45	67,47	67,52
Grau de Orientação Axial	1,1970	1,1958	1,1967	1,1969
Grau de Orientação Circunferencial	1,9652	1,9695	1,9679	1,9632

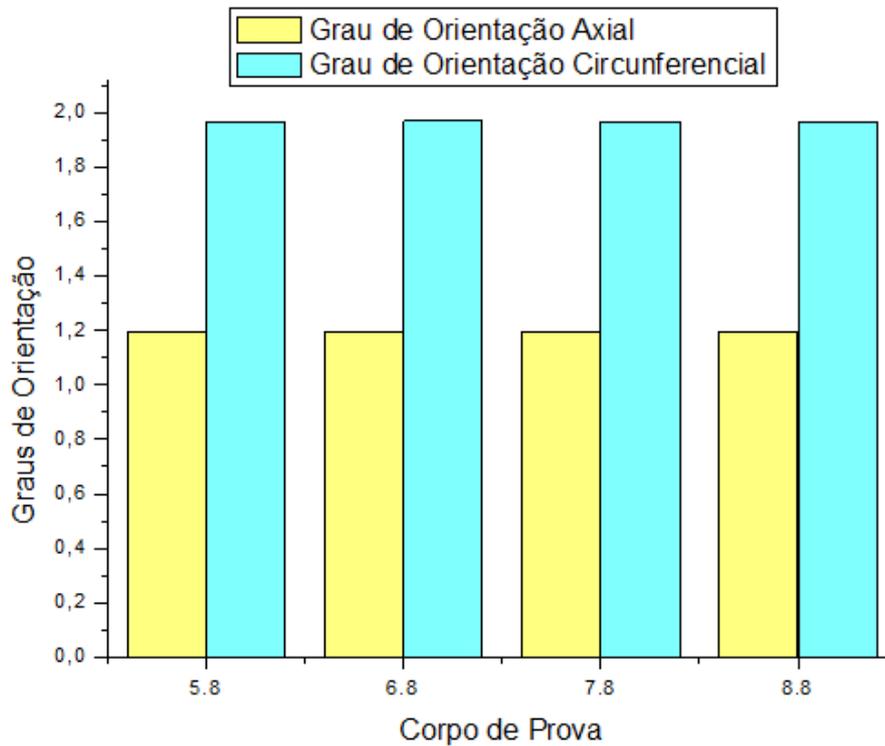


Figura 93. Quantificação dos Graus de Orientação.

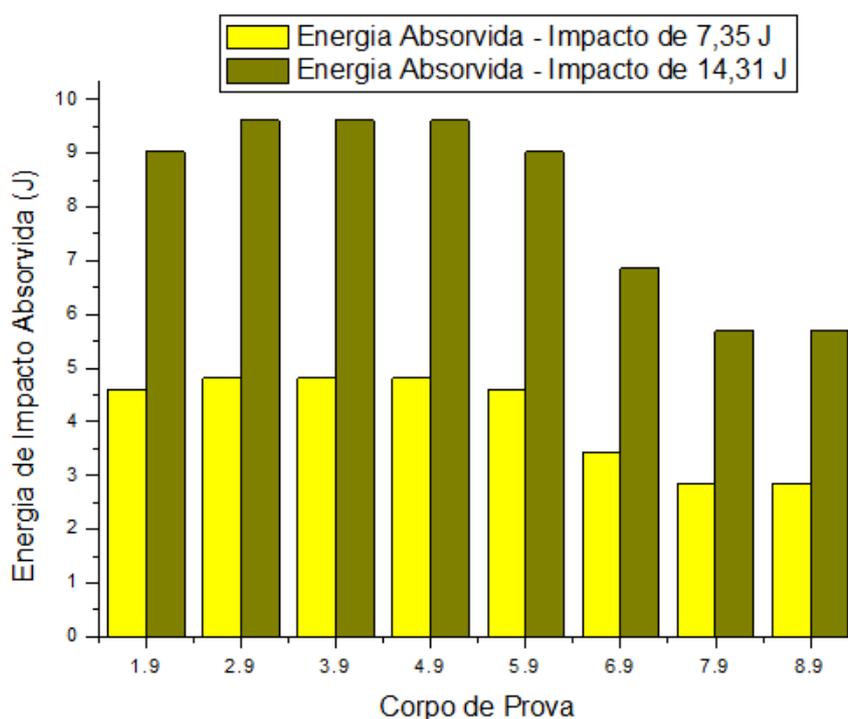
Diante dos resultados listados na Tabela 36 e Figuras 92 e 93, podemos verificar que os corpos de prova apresentaram graus de orientação axial e circunferencial com valores quase idênticos e conformes quanto aos valores padrão especificados na Norma NBR 15750.

6.9. Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Pêndulo de Charpy

Os resultados do Ensaio de verificação da resistência ao impacto com pêndulo de charpy foram obtidos a partir da quantificação da energia potencial absorvida pelo material será necessária para a propagação de uma trinca pré-existente (entalhe) ou até mesmo a fratura do mesmo. Estes resultados, depois de desferidos os golpes nos corpos de prova com o pêndulo de impacto Charpy Zwick, são mostrados na Tabela 37 e Figura 94.

Tabela 37. Resultados do Ensaio de Verificação da Resistência ao Impacto com Pêndulo de Charpy.

Tipo do Tubo	Corpo de Prova	Energia de Impacto Aplicada (kpcm)	Energia de Impacto Absorvida (kpcm)	Energia de Impacto Aplicada (J)	Energia de Impacto Absorvida (J)	
PVC-U	1.9	75	47	7,35	4,61	
		150	92	14,71	9,02	
	2.9	75	49	7,35	4,81	
		150	98	14,71	9,61	
	3.9	75	49	7,35	4,81	
		150	98	14,71	9,61	
	4.9	75	49	7,35	4,81	
		150	98	14,71	9,61	
	PVC-O	5.9	75	47	7,35	4,61
			150	92	14,71	9,02
6.9		75	35	7,35	3,43	
		150	70	14,71	6,86	
7.9		75	29	7,35	2,84	
		150	58	14,71	5,69	
8.9		75	29	7,35	2,84	
		150	58	14,71	5,69	

**Figura 94. Energia Potencial de Impacto Absorvida quando do lançamento do Pêndulo de Charpy.**

Diante dos resultados listados na Tabela 37 e Figura 94, podemos verificar que os corpos de prova extraídos a partir de tubos com orientação molecular apresentaram maiores níveis de amortecimento ao impacto e resistência ao cisalhamento, em termos de energia potencial aplicada (cerca de 38%).

Após o término do Ensaio foram verificados os aspectos das regiões de impacto, de onde se constata claramente pontos de concentração de tensão nos corpos de prova extraídos dos tubos sem orientação molecular, ocasionados pela maior capacidade de absorção de energia potencial por parte deste tipo de tubo, conforme mostrado na Figura 95.

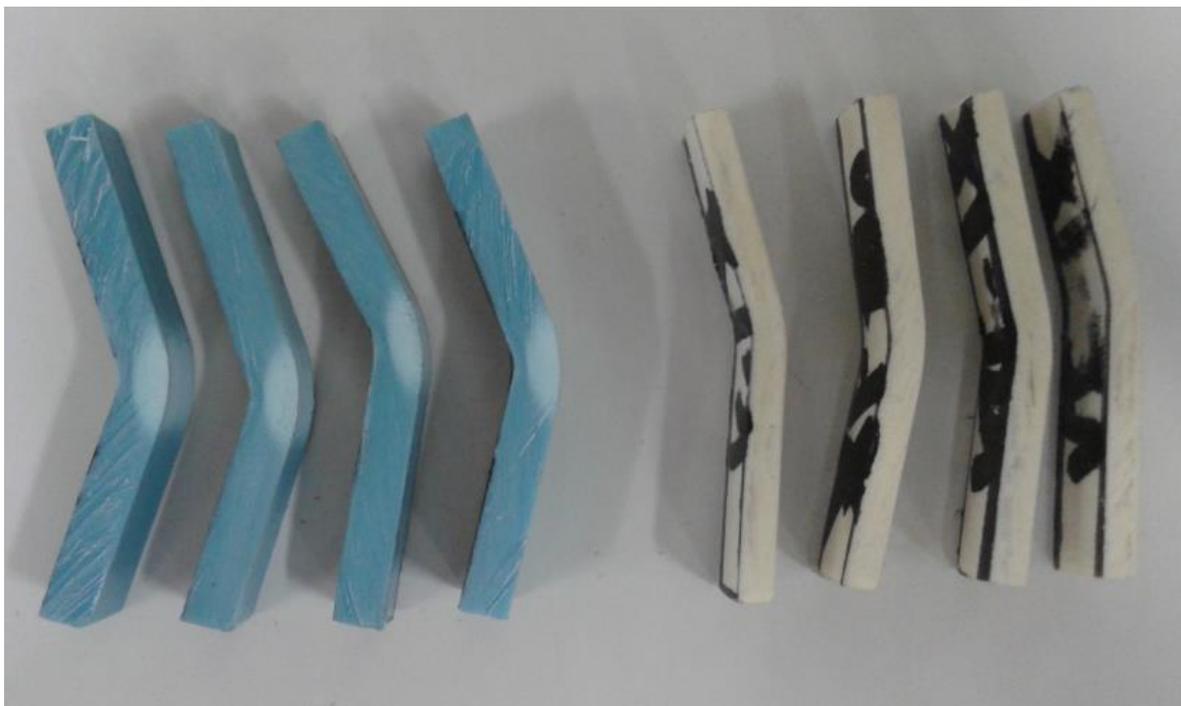


Figura 95. Aspectos dos corpos de prova após a execução do ensaio de verificação da resistência ao impacto com pêndulo de Charpy (Mexichem, 2015).

7. CONCLUSÕES

7.1. Resistência ao Impacto com Percussor Metálico

Nas amostras não orientadas foi observado o desenvolvimento da trinca na direção dos caminhos de menor interação intermolecular. Desta forma, verificamos que os corpos de prova extraídos de tubos com orientação molecular apresentaram menores níveis de profundidades das depressões diante das Energias potenciais geradas a partir das quedas dos percussores, assim como uma menor redução percentual média de espessura, refletindo em maiores níveis de amortecimento ao impacto e resistência à perfuração.

7.2. Resistência à Pressão Hidrostática Interna

Através do processo de bi orientação molecular, foram verificadas diversas melhorias nas características de performance a curto prazo, no que se diz respeito a Tensão Circunferencial Induzida, Tensão Limite de Confiança Inferior, Tensão Circunferencial Admissível de Projeto e Tensão Admissível do Material, possibilitando uma grande diminuição no Coeficiente de Segurança de Projeto ou Serviço, e permitindo, conseqüentemente, um projeto de Tensão Hidrostática relativamente alto previsível à longo prazo e um maior nível de Classificação e Dimensionamento de tubos, conforme as Normas Vigentes, com maiores valores Resistência Mínima Requerida associados, quando da comparação com outros tipos de polímeros, inclusive.

Vale salientar que, é importante notar que não haverá nenhum enfraquecimento do tubo ao longo do tempo, pois um tubo, mesmo sujeito por um longo tempo a sua pressão nominal, ainda mantém sua resistência a pressões mais altas de curto prazo, como se fosse um tubo novo.

7.3. Resistência ao Cloreto de Metileno (Grau de Gelificação)

Através do processo de bi orientação molecular, apesar de um provável nível elevado de vazios e contornos de grão existentes na pré-forma, oriundo de um baixo nível de gelificação, que poderia levar a queda na eficiência da orientação e

aparecimento de concentrações de tensões nesses pontos da matriz dúctil, podendo levar à falha precoce da peça pronta, pode-se concluir que a matriz foi bem gelificada no processo de conformação da pré-forma, e que grande parte da energia gasta no estiramento foi consumida na deformação das cadeias, enquanto o deslizamento entre grãos e alongamento de vazios foi pouco significativo. Desta forma, foi obtido o grau de gelificação ótimo, as partículas primárias remanescentes do processo de gelificação e fusão apresentam o máximo grau de coesão, com forças de ligação extremamente fortes, persistindo na estrutura interna do composto os pequenos vazios estruturais que atuam com aliviadores de tensão, conferindo-lhe um ótimo grau de homogeneidade entre as condições de processamento e as propriedades mecânicas do produto transformado. Em contrapartida, após a realização do Ensaio, foram identificados pontos de ataque somente nos corpos de prova extraídos de tubos sem orientação molecular.

Uma importante limitação deste Ensaio é que este não pode diferenciar amostras que alcançaram elevado grau de gelificação. A razão é que o cloreto de metileno não produz um ataque superficial para graus de gelificação acima de um grau moderado.

7.4. Resistência à Compressão Diametral

Através do processo de bi orientação molecular, foi verificado o aumento de cerca de 2,34 vezes da resistência a pior condição teórica de subpressão, que seria vácuo total (0,1 MPa). Foi verificado também o aumento do Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson do material, o que leva ao conseqüente aumento da resistência a achatamentos provenientes de cargas e tensões de compressão, assim como maiores níveis de resistência à pressão crítica de colapso iminente, gerando menores níveis de achatamento residual para os mesmos níveis de deflexão aplicados.

7.5. Estabilidade Dimensional

A estrutura deste tubo orientado molecularmente é estável até a temperatura de transição vítrea (em torno de 75 °C). Acima dessa temperatura o material tem uma fase com mobilidade molecular, com característica viscoelástica (borrachosa), e seu acondicionamento nessas condições propicia ao tubo retornar aproximadamente às suas dimensões originais de extrusão. O sistema de tubulação orientado molecularmente é

indicado, nesse caso, para o transporte de água bruta, potável ou servida sob pressão e sob temperaturas que não excedam 45 °C.

7.6. Classe de Rigidez e Resistência ao Achatamento

Através do processo de bi orientação molecular, fora verificada a necessidade de aplicação de menores forças de compressão, para a geração dos mesmos níveis de deflexão, refletindo em uma maior ductilidade e tenacidade do material, assim como menores constantes elásticas e classes de rigidez, refletindo também em maiores Módulos de Elasticidade e conseqüentemente em maiores níveis de deflexão suportados para os mesmos níveis de carga aplicados.

7.7. Resistência ao Prolongamento da Fissura

O PVC com orientação molecular pode ser considerado altamente resistente ao entalhe, refletindo em um aumento da tenacidade do Material. Devido à morfologia da orientação do material do tubo, não há risco de propagação rápida de eventual fissura.

O fenômeno da fadiga devido às cargas cíclicas está associado à formação e propagação de trincas nos materiais. O PVC-O, com sua estrutura em camadas, dificulta a propagação de trincas na direção radial, apresentando, em decorrência, elevada resistência à fadiga.

Para romper a parede do tubo, uma trinca deve percorrer todas as camadas, sendo elevada a energia de propagação da falha, dissipada na superfície dos planos. Esse mecanismo diferenciado de fratura do PVC-O, com aumento na tenacidade à fratura, permite baixar coeficientes de segurança para projetos de tubulações, que são inferiores em relação ao PVC-U ou PVC convencional.

7.8. Grau de Orientação Molecular

Foi verificado que, quanto maior o grau de orientação molecular, ou razão de estiramento, ou seja, a relação entre dimensão no eixo de estiramento do orientado e

dimensão da pré-forma, maior o nível de orientação a uma mesma temperatura. Isso resulta no maior ganho nas propriedades mecânicas citadas anteriormente.

7.9. Resistência ao Impacto com Pêndulo de Charpy

Conforme os resultados observados, pode-se associar o ganho na resistência ao impacto avaliado nesse ensaio, ao nível de orientação. Ao se orientar as cadeias poliméricas no sentido transversal à propagação da trinca, cria-se um efeito dissipador de tensões, fato comprovado pela não observação de pontos de concentração de tensão nos corpos de prova extraídos dos tubos com orientação molecular. Este mecanismo baseia-se na maior energia necessária para se penetrar o corpo de prova na direção da orientação do que na direção transversal à mesma, devido a maior interação intermolecular entre cadeias ao longo do eixo paralelo a orientação. Como não há grande interação entre as cadeias perpendicularmente à orientação, pode-se imaginar planos com menor energia de coesão, que se portam como barreiras à propagação da penetração por impacto ou mesmo da trinca, esta que acaba por caminhar por sobre esses planos (menor energia de fratura). As cadeias estiradas perpendicularmente à direção de desenvolvimento da trinca têm suas extremidades ancoradas em regiões vizinhas ao eixo de propagação da fratura, dissipando a energia nessas regiões.

Nas amostras não orientadas foi observado o desenvolvimento da trinca na direção dos caminhos de menor interação intermolecular.

7.10. Características Estruturais e Operacionais Finais

Através do processo de bi orientação molecular, as moléculas do material são orientadas no sentido dos principais esforços solicitantes: circunferencial e longitudinal. Como consequência da orientação molecular, a estrutura de parede passa a ser constituída por finas camadas (laminar), resultando em uma estrutura extremamente robusta. À medida que se desenvolve a bi orientação, esta estrutura lamelar, se torna concêntrica ao tubo, como camadas sobrepostas de um tecido. A orientação é levada a efeito em temperaturas bem acima da temperatura de transição vítrea, ou seja, a temperatura acima da qual as cadeias moleculares da fase amorfa de um dado polímero adquirem mobilidade, podendo assim ser orientadas.

Diante dos ganhos do tubo de PVC-O frente ao produto de PVC rígido convencional, é possível obter economia de 50% de material frente aos tubos de PVC convencionais e 30% frente aos tubos de PVC com modificadores de impacto (PVC-M). Como consequência, em virtude da sua maior resistência e conseqüentemente menor espessura de parede, obtém-se um tubo com menor peso, o que facilita o transporte, manuseio e instalação, dispensando equipamentos pesados, tendo maior área de vazão em comparação aos tubos de PVC não orientados e outros materiais como o Polietileno e Ferro Fundido. Esta característica, associada à superfície interna extremamente lisa, confere-lhe melhor desempenho hidráulico.

Os tubos bi orientados apresentam economia considerável de energia na sua fabricação, em comparação às soluções similares encontradas no mercado para esta aplicação, minimizando os impactos ao meio ambiente.

Por fim, alinhado ao acoplamento simples (ponta e bolsa com junta elástica) faz a diferença em termos de custo operacional, desempenho e velocidade de instalação em relação a tubulações feitas com outros materiais.

7.11. Sobre a pesquisa

A pesquisa resultou em avanços no conhecimento relativo ao tema orientação molecular de produtos em PVC. Foi possível avaliar a eficácia do processo de bi orientação para a melhoria das propriedades mecânicas finais de tubos.

7.12. Transferência de Tecnologia

Os conhecimentos adquiridos nesta pesquisa poderão ser divulgados ao meio técnico e à indústria através de publicações e de palestras, desde que em alinhamento com as estratégias de divulgação da Indústria de Transformação de Plásticos do Brasil S.A.

7.13. Propostas de temas para a continuidade da pesquisa

O experimento, o primeiro a ser realizado no Brasil com o objetivo de obter informações quantitativas sobre a influência da bi orientação molecular em compostos de PVC, forneceu alguns indícios que necessitam ser complementarmente investigados. Este projeto experimental deixou de focar pontos relevantes no desenvolvimento desta nova classe de materiais por conta de limitações de espaço e tempo.

A composição das formulações de tubos normalmente leva diferentes aditivos e cargas de enchimento. A influência de cada aditivo na orientação e propriedades do PVC-O, no entanto, ainda não foram estudados e/ ou discutidos significativamente, as informações nesse nível de detalhe possivelmente ainda se restringem aos fabricantes dos tubos bi orientados.

Dependendo do grau de orientação induzido no processo de produção, obtêm-se valores de resistências e MRS diferentes.

Como proposta de continuidade deste trabalho são dadas as seguintes sugestões:

- Investigar a influência de cada aditivo na orientação e propriedades do PVC-O, de forma a relacionar e quantificar os ganhos nas propriedades mecânicas finais de acordo com cada carga de aditivo aplicada;
- Adotar novos níveis de Tensão Hidrostática previsíveis à longo prazo (12,5 e 17,5 MPa), de forma a desenvolver a tecnologia de bi orientação molecular, relacionando diversos graus de orientação com os ganhos nas propriedades mecânicas finais do produto, aumentando assim a gama de aplicações do produto, estimulando o mercado, assim como o seu uso como solução sustentável, em virtude também dos baixos níveis de energia empregados em sua fabricação;
- Implementar os Métodos e Parâmetros de Ensaio utilizados neste trabalho nas Normas Brasileiras Regulamentadoras as quais referenciam os produtos em

questão, por meio de debates nos Comitês de Avaliação de Normas da ABNT, onde a COMPESA possui um representante legal.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST, Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **Perfil da Indústria Brasileira de Transformação de Material Plástico**, 2014.

ADDCOMP. PLASTICS ADDITIVES & COMPOUNDING. **PVC additives – What lies ahead?** November/December 2014. Disponível em: www.addcomp.com. Acesso em: 12 de novembro de 2014.

ALVES, J.P.D.; RODOLFO JUNIOR, A. **Análise do Processo de Gelificação de Resinas e Compostos de PVC Suspensão**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 16, nº 2, p. 165-173, 2006.

ARAÚJO, L. **Chegou a hora**. São Paulo: Instituto do PVC, p. 1-2, 2014. Disponível em www.institutodopvc.org. Acesso em: 05 de abril de 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Tubos e conexões de PVC-U com junta soldável para sistemas prediais de água fria — Requisitos; NBR 5648**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Sistemas para adução e distribuição de água – Tubos de PVC 12 DEFOFO com junta elástica – Requisitos; NBR 7665**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Tubulações de PVC-O (cloreto de polivinila não plastificado orientado) para sistemas de transporte de água ou esgoto sob pressão – Requisitos e métodos de ensaios; NBR 15750**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Tubos de PVC – Verificação da resistência ao impacto; NBR 14262**. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Tubos de PVC – Verificação da resistência à pressão hidrostática interna; NBR 5683**. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Tubos de PVC – Verificação da compressão diametral; NBR 14272**. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Tubos de PVC – Verificação da estabilidade dimensional; NBR 5687**. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Tubos de PVC – Determinação da classe de rigidez; ABNT NBR 9053**. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Tubos de revestimento em PVC para poços profundos – Verificação da flexão ao impacto; NBR 13607**. Rio de Janeiro, 1996.

BRASKEM. **Folha de dados. Policloreto de vinila – PVC – Norvic® SP 800**. Disponível em www.braskem.com.br. Acesso em: 10 de mar de 2014.

BREEN, J.; Boersma, A., SLAATS, P. G. G. & VREEBURG, J. H. G. - "*Long Term Performance Prediction of Existing PVC Water Distribution Systems*", in: Apresentação na Plastics Pipes XII Conference (2004).

CASTRO, H. F.; MENDES, A. A.; SANTOS, J. C.. **Modificação de óleos e gorduras por biotransformação**. Química Nova, vol. 27, n° 1, p. 146–156, 2004.

CANEVAROLO, S. V. Jr. **Ciência dos Polímeros**. 2ª Ed. São Paulo, Artliber Editora Ltda, 2006.

CLARK, M. Particle formation. In: BUTTERS, G. (Ed.). **Particulate nature of PVC: formation, nature and processing**. Londres: Applied Science Publishers, 1982.

CMAI. **2003 world vinyl analysis**. Houston: Chemical Market Associates, Inc., 2003.1 CD.

DANIELETTO, J.R.B. **Manual de Tubulações de Polietileno e Polipropileno - Características, Dimensionamento e Instalação**. 2ª Ed. São Paulo, Editora Aberta, 2007.

DANIELETTO, J.R.B. **Manual de Tubulações de Polietileno e Polipropileno - Características, Dimensionamento e Instalação**. 3ª Ed. São Paulo, Editora Aberta, 2014.

DEMIR, H.; SIPAHIOGLU, M.; BALCKOSE, D.; ULKU, S.. **Effect of additives on flexible PVC foam formation.** Journal of Materials Processing Technology, vol. 195, p. 144–153, 2008.

DONATO, M.. **O Mundo do Plástico.** Editado por Goyana S. A., 1972.

FILLOT, L. A.; Gauthier, C.; Hajji, P. **DSC Technique: a powerful Tool to Characterize PVC Gelation.** in: The 9th International PVC Brington Conference: PVC 2005, Brighton, 2005.

FUMIRE, J. **A New, Revolutionary Process for PVC Bi-Oriented Pipes.** KRV Nachrichten, vol. 1, p. 25, Alemanha, 2008.

GILBERT, M. & HITT, D. J. **Mater. Sci. Technol.**, vol. 8, p.739 (1992).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Plastics piping and ducting systems - Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation; ISO 9080,** 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Thermoplastics materials for pipes and fittings for pressure applications - Classification, designation and design coefficient; ISO 12162,** 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Plastics piping systems for water supply and for buried and above-ground drainage and sewerage under pressure - Unplasticized poly(vinyl chloride) (PVC-U) - Part 1: General; ISO 1452-1,** 2009.

INSTITUTO DO PVC. Disponível em: <<http://www.institutodopvc.org/publico/>>. Acesso em: 08 de março de 2014.

JOHANSSON, L. **Polymer Testing.** vol. 6, p. 279, 1986.

MARTINS, J. N.; FREIRE, E. & HEMADIPOUR, H. **Polímeros,** vol. 19, (2009).

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos.** Artliber Editora, São Paulo, 2005.

MARQUES, P. R.; Covas, J. A. **Companhia Industrial de Resinas Sintéticas**. Cires S.A., 33 páginas (2003)([www.cires.pt/grupocires/home.nsf/WWWCiresEngDownloads/1ABC447042DA3E5A80256DC5004115ED/\\$FILE/cires%20PVC2.pdf](http://www.cires.pt/grupocires/home.nsf/WWWCiresEngDownloads/1ABC447042DA3E5A80256DC5004115ED/$FILE/cires%20PVC2.pdf)) (acessado em: 02 de junho de 2015).

MARTINZ, D. O. & QUADROS. J. “*Compounding PVC With Renewable Materials*”, in: 10th International PVC Conference (2008).

MEDEIROS, F.A.; WIEBECK, H. **PVC Orientado – Avaliação de Processo de Orientação e das Propriedades Mecânicas em Função da Razão de Estiramento**. Revista Polímeros, vol. 23, nº 5, p. 636-643, 2013.

MEXICHEM. **Instrução de Trabalho Mexichem ITR 0513 – PHI Tubos**. 2015.

MEXICHEM. **Instrução de Trabalho Mexichem ITR 0805 – Grau de gelificação em Tubos**. 2015.

MEXICHEM. **Instrução de Trabalho Mexichem ITR 0782 – Verificação da Resistência à Compressão**. 2015.

MEXICHEM. **Instrução de Trabalho Mexichem ITR 0508 – Verificação da Estabilidade Dimensional**. 2015.

MEXICHEM. **Instrução de Trabalho Mexichem ITR 0525 – Classe de Rigidez / Achatamento – Tubos**. 2015.

MEXICHEM. **Instrução de Trabalho Mexichem ITR 0784 – Verificação da Resistência ao Anel C**. 2015.

MEXICHEM. **Instrução de Trabalho Mexichem ITR 0461 – Ensaio de Grau de Orientação**. 2015.

MEXICHEM. **Instrução de Trabalho Mexichem ITR 0803 – Resistência ao Impacto Charpy**. 2015.

MEXICHEM. **Manual Técnico da Linha de Tubos BIAX**. 44 f., 2009.

MOLL, J.N. **Tubos de PVC Orientado: Uma Alternativa Tecnológica para a Condução de Água e Esgoto sob Pressão em Saneamento**. SANEAS, vol. 36, nº X, p. 26-28, 2010.

MOLL, J.N.; PIRES, R.M. **Avaliação da performance do PVC DEFOFO rígido x PVC DEFOFO dúctil: uma alternativa também necessária no Brasil**. SANARE Revista Técnica da Sanepar, Curitiba, vol. 22, nº 22, p. 25-37, 2004.

MOGHRI, M; GARMABI, H.J. **Vinyl Addit. Technol.** nº 9, p.81, 2003.

MORAES, R. **Revista Plástico Moderno.** nº 315, 2000.

NASS, L. I.; HEIBERGER, C. A. (Ed.). **Encyclopedia of PVC – Volume 1: Resin manufacture and properties.** 2ª ed. Nova York: Marcel Dekker, 1986.

PISZCZEK, K.; STERZYNSKI, T. T.; ŁUKASZEWICZ, E. – **Polymer Testing**, nº 22, p. 115, 2003.

RENOLIT ONDEX. Disponível em: <www.ondex.com>. Acesso em: 08 de junho de 2014.

RODOLFO, A.; NUNES, L. R.; ORMANJI, W. **Tecnologia do PVC**. São Paulo, Braskem. 18ª Ed., 2006.

RODOLFO JR., A. **Estudo da Processabilidade e das Propriedades de PVC Reforçado com Resíduos de PINUS**. 2006. 247 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

RODOLFO JR., A.; NUNES, L. R.; ORMANJI, W. **Tecnologia do PVC**. São Paulo: ProEditores Associados, 2002.

SUMMERS, J. W. **Encyclopedia of Chemical Technology - Vinyl Polymers (PVC) Poly(vinyl chloride)**. 4ª Ed., 1996.

TACIDELLI, A. R.; ALVES, J. J. N.; VASCONCELOS, L. G. S.; BRITO, R. P.. **Increasing PVC suspension polymerization productivity – An industrial application**. Chemical Engineering and Processing, vol. 48, p. 485–492, 2009.

TIMOSHENKO, S. P. **Resistência dos materiais**. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A., 1973.

TITOW, W. V. (Ed.). **PVC technology**. 4. ed. Londres: Elsevier Applied Science Publisher, 1984.

VINHAS G. M.; SOUTO-MAIOR R. M.; ALMEIDA Y. M. B.. **Estudo de Propriedades de PVC Modificado com Grupos Alquila e Benzila**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 15, n° 3, p. 207-211, 2005.

YONG-ZHONG, B.; ZHI-MING, H.; SHEN-XING, L.; ZHI-XUE, W.. **Thermal stability, smoke emission and mechanical properties of poly(vinyl chloride)/hydrotalcite nanocomposites**. *Polymer Degradation and Stability*, vol. 93, p. 455 e 448, 2008.

APÊNDICE A – Análise de regressão em uma tubulação de PVC-O DN100 Amanco Brasil (Regression Analysis on a DN100 PVC-O Pipe From Amanco Brasil).

APÊNDICE B – Relatórios de verificação da resistência a pressão hidrostática interna de curta duração Emitidos pelo Software IPT Datalogging V4.0, do Equipamento de pressurização com regulador de pressão para teste de pressão hidrostática interna.

**APÊNDICE C – Relatórios de verificação da resistência a compressão diametral
Emitidos pelo software para parametrização de ensaios mecânicos Tesc Versão
Full 3.04, da Máquina Universal de Ensaio EMIC DL 10000.**

APÊNDICE D – Relatórios de verificação de determinação da classe de rigidez e resistência ao achatamento emitidos pelo software para parametrização de ensaios mecânicos Tesc Versão Full 3.04, da Máquina Universal de Ensaio EMIC DL 10000.