

IX-050 – TUBULAÇÕES CORRUGADAS PARA DRENAGEM PLUVIAL COM INCORPORAÇÃO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE RECICLADO

Simone Nakamoto Taninaga⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Mestre em Habitação: Planejamento e Tecnologia pelo Mestrado Profissional em Habitação do IPT. Pesquisadora do Laboratório de Instalações Prediais e Saneamento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT.

Daniel Setrak Sowmy⁽²⁾

Engenheiro Civil e Prof. Dr. da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Pesquisador do Laboratório de Instalações Prediais e Saneamento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT.

Gibran da Cunha Vasconcelos⁽³⁾

Engenheiro de Materiais pela UNESP. Mestre em Engenharia Mecânica pela UNESP. Pesquisador do Laboratório de Análises Químicas do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT. Doutorando em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Endereço⁽¹⁾: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - Av. Prof. Almeida Prado 532 - Cidade Universitária - Butantã - CEP: 05508-901 - São Paulo - SP - Brasil - Tel: (11) 3731-4153 - e-mail: simonen@ipt.br

RESUMO

Nos Estados Unidos, o uso de polietileno reciclado pós-consumo e pós-indústria é normalizado desde 2007 com a publicação da primeira versão da ASTM F2648, aplicável aos tubos corrugados de polietileno de alta densidade (PEAD) para drenagem agrícola, superficial, de campos abertos e de estacionamentos. Estudos desenvolvidos pelo NCHRP¹ avaliaram o impacto do uso de polietileno reciclado pós-consumo e pós-indústria no desempenho de tubos corrugados de polietileno no período e demonstraram que há condições de apresentarem desempenho de curto e longo prazo equivalente ao dos tubos produzidos com resinas de polietileno de alta densidade 100% virgem. No Brasil ainda se trata de um produto inovador, com um histórico de aplicação a ser construído.

Este artigo tem o objetivo apresentar o estudo realizado no Brasil sobre os tubos corrugados de PEAD com incorporação de polietileno reciclado para drenagem de águas pluviais, bem como a proposição de requisitos e critérios mínimos para que apresentem um desempenho adequado durante a sua vida útil.

PALAVRAS-CHAVE: Drenagem Pluvial, PEAD, Tubulações Corrugadas, Polietileno Reciclado.

INTRODUÇÃO

Com a publicação da norma brasileira ABNT NBR ISO 21138 Partes 1 a 3 em maio de 2016, os tubos de policloreto de vinila (PVC), polietileno (PE) e polipropileno (PP) de parede estruturada passaram a ter uma norma brasileira para o estabelecimento dos requisitos e critérios mínimos para sistemas de coleta de esgoto e drenagem subterrânea. Antes da publicação desta norma, a normalização brasileira se limitava a especificação de requisitos de tubos para sistemas de coleta de esgoto sanitário de PVC (parede maciça, corrugado de dupla parede e de núcleo celular) e de PE (corrugado de dupla parede). Segundo a ABNT NBR ISO 21138-3:2016, os tubos de parede estruturada são produtos que têm um projeto otimizado com relação ao material utilizado, a fim de atingir os requisitos físicos, mecânicos e de desempenho. Estes tubos podem ser classificados como Tipo A, tubos com superfície externa lisa (Figura 1) ou Tipo B, tubos com superfície externa não lisa (Figura 2). Desta forma, as tubulações de parede estruturada representam uma alternativa interessante para aplicações não pressurizadas, onde são necessários grandes diâmetros e uma adequada resistência mecânica.

¹ National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) é um fórum de pesquisas colaborativas que aborda questões relativas aos Departamentos de Transporte dos 50 Estados dos EUA (DOTs) e profissionais da área de transportes de todos os níveis do governo americano e setor privado.

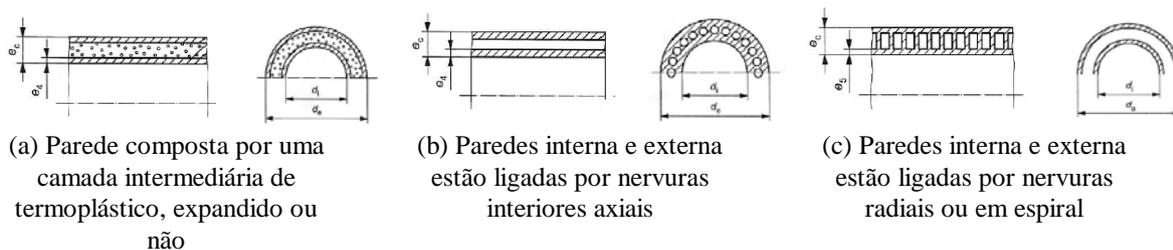


Figura 1: Exemplos típicos de construção de parede do Tipo A (Fonte: ABNT NBR ISO 21138-2:2016).

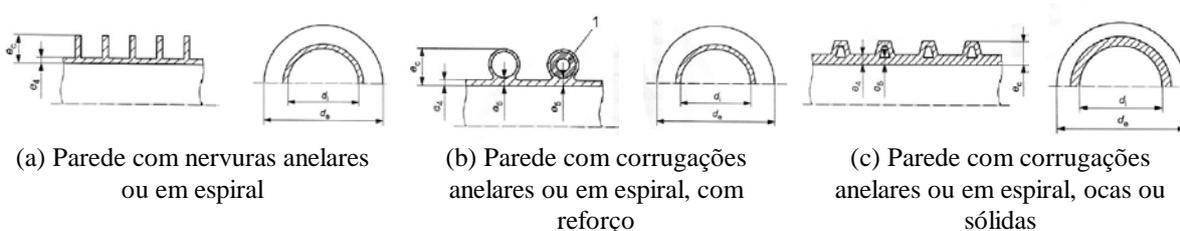


Figura 2: Exemplos típicos de construção de parede do Tipo B (Fonte: ABNT NBR ISO 21138-3:2016).

A ABNT NBR ISO 21138 Partes 1 a 3 passou a vigorar em junho de 2017, estabelecendo requisitos para tubos estruturados e conexões de diâmetros até 1200 mm. Esta norma não diferencia os requisitos e critérios em função da aplicação, ou seja, os requisitos exigidos para os tubos para sistemas de coleta de esgoto e sistemas de drenagem subterrânea são os mesmos. Outro ponto a ser destacado é o fato desta norma permitir o uso de material reciclado de origem externa, desde que seja proveniente de tubos ou conexões.

A reciclagem, em todos os contextos, é uma alternativa para economia de recursos naturais e uma forma de reduzir a quantidade de resíduos plásticos que são destinados como lixo. Porém, garantir a consistência de propriedades dos produtos gerados a partir de materiais reciclados é um desafio. Assim, a definição de faixas de propriedades e concentrações que podem ser adicionadas em misturas com resinas virgens, é de extrema importância a fim de se assegurar o desempenho e atendimento de requisitos de produtos (THOMAS; CUTTINO, 2011).

A incorporação de materiais reciclados em produtos com função estrutural demanda uma série de avaliações técnicas com relação à aplicabilidade do produto. Essas avaliações incluem a disponibilidade de matéria-prima, contaminantes, propriedades dos materiais, qualidade do produto acabado e tipo de aplicação do produto. A maior preocupação com o uso de materiais reciclados é em relação aos contaminantes, especialmente quando o material é proveniente de produtos pós-consumo. A remoção de contaminantes é crítica e tem impacto significativo na durabilidade do material devido ao fissuramento sob tensão. Para algumas aplicações, pode ser necessária a incorporação de resinas de alta pressão para atendimento aos requisitos finais de desempenho do material. O balanceamento de propriedades entre as resinas virgens e recicladas promove matérias-primas que podem atender aos requisitos de desempenho de longo prazo. (KURDZIEL, 2014).

Nos Estados Unidos, o uso de polietileno reciclado pós-consumo e pós-indústria, de origem externa ao fabricante do tubo, é normalizado desde 2007 com a publicação da primeira versão da ASTM F2648 - "Standard Specification for 2 to 60 inch [50 to 1500 mm] Annular Corrugated Profile Wall Polyethylene (PE) Pipe and Fittings for Land Drainage Applications". Esta norma aplica-se aos tubos corrugados de polietileno de alta densidade (PEAD) para drenagem agrícola, superficial, de campos abertos e de estacionamentos.

Estudos desenvolvidos pelo NCHRP avaliaram o impacto do uso de polietileno reciclado pós-consumo e pós-indústria no desempenho de tubos corrugados de polietileno no período de 2007 a 2017. Estes estudos demonstraram que tubos corrugados produzidos com concentrações de polietileno de alta densidade reciclado, têm condições de apresentar desempenho de curto e longo prazo equivalente ao dos tubos produzidos com resinas de polietileno de alta densidade 100% virgens (THOMAS e CUTTINO, 2011). Pesquisas comprovaram também que estes tubos podem ser aplicados em drenagem de ferrovias e rodovias, desde que atendam aos requisitos mínimos estabelecidos (PLUIMER et al., 2018). Estes estudos serviram de base técnica para as revisões da norma ASTM F2648, e mais recentemente da publicação da norma AASHTO M 294-18.

Este artigo tem o objetivo apresentar o estudo realizado sobre os tubos corrugados de PEAD com incorporação de polietileno reciclado para drenagem de águas pluviais (Figura 3), limitado a 60% de polietileno reciclado pós-consumo.

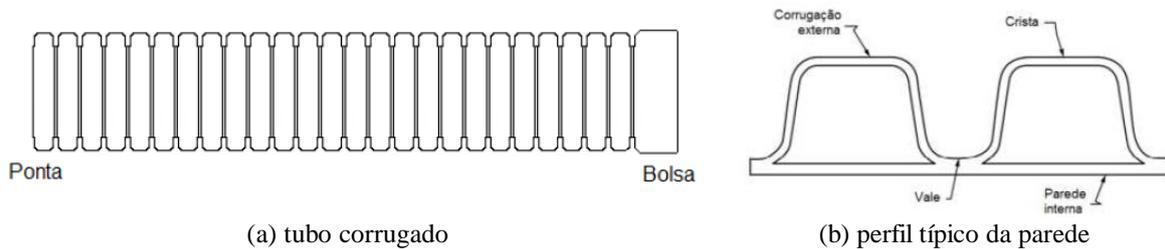


Figura 3: Tubos corrugados de PEAD com incorporação de polietileno reciclado para drenagem de águas pluviais (Fonte: BRASIL, 2018).

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo teve duração de 12 meses e foi realizado em duas etapas que estão resumidamente apresentadas na Tabela 1. A Etapa 1 teve como foco a verificação da viabilidade do uso dos tubos de PEAD de parede estruturada com polietileno reciclado incorporado por meio de pesquisas bibliográficas, visitas técnicas e ensaios laboratoriais. A realização da Etapa 2 estava condicionada aos resultados obtidos na Etapa 1, ou seja, seria realizada apenas se fosse confirmada a viabilidade do uso dos tubos de PEAD de parede estruturada com polietileno reciclado.

Tabela 1: Etapas do estudo (Fonte: Elaborado pelos autores)

Etapa	Breve descrição da atividade	Duração (meses)
1	Atividade 1: Pesquisa bibliográfica / visitas técnicas	3
	Atividade 2: Ensaios exploratórios em diferentes formulações	3
	Atividade 3: Ensaios em tubos corrugados	4
2	Atividade 4: Definição de requisitos e critérios mínimos	2

As duas etapas de trabalho serão descritas a seguir:

ETAPA 1: PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E ENSAIOS LABORATORIAIS

A realização de uma extensa revisão bibliográfica foi a primeira atividade da ETAPA 1 do estudo, onde se procurou conhecer o estado da arte do uso de polietileno reciclado, identificando e analisando normas técnicas nacionais e internacionais aplicáveis, artigos acadêmicos e resultados de pesquisas relacionadas ao uso de polietileno e outros plásticos reciclados. Nesta atividade também foram realizadas visitas técnicas a fabricantes de tubos e recicladores de materiais plásticos. O foco principal desta revisão foi o polietileno reciclado pós-consumo, devido ao fato deste material apresentar maior probabilidade de variação de suas propriedades e estar mais prontamente disponível no mercado. Adicionalmente, o polietileno reciclado pós-indústria e o reprocessado também foram avaliados.

A partir da revisão bibliográfica (Atividade 1) foram produzidas em laboratório 15 formulações com diferentes percentuais de PEAD reciclado (pós-consumo, pós-indústria e reprocessado), 2 tipos de resinas de PEAD virgem e pigmento negro de fumo. A Figura 4 apresenta exemplos dos PEADs reciclados utilizados neste estudo, onde a Figura 4(a) apresenta o PEAD reciclado pós-consumo em flocos (*flakes*) composto, por exemplo, de frascos, garrafas e outros artigos utilizados pelo consumidor final e que foram descartados. O PEAD proveniente do próprio processo do fabricante de tubos denominado aqui como “reprocessado” é ilustrado na Figura 4(b), cuja origem é de tubos que, por determinado motivo, foram refugados durante a produção, e desta forma nem chegaram a ser utilizados. A Figura 4(c) apresenta o PEAD reciclado já em grânulos, cuja origem pode ser pós-consumo ou pós-indústria.



(a) Fragmentos (pós-consumo ou pós-indústria)

(b) Moído (reprocessado)

(c) Grânulos (pós-consumo ou pós-indústria)

Figura 4: Exemplos de polietileno reciclado utilizados no estudo (Fonte: Elaborado pelos autores)

As 15 formulações foram analisadas (Atividade 2) por meio de requisitos e critérios mínimos preliminarmente identificados na Atividade 1. A escolha dos requisitos teve como referência a curva típica dos modos de falha dos tubos de polietileno, objetivando conhecer o comportamento destas formulações nos estágios I, II e III.

A Figura 5 apresenta os três estágios distintos de ocorrência das falhas. No estágio I o material apresenta falha por ruptura dúctil quando submetido a tensões altas. No estágio II, o material está submetido a cargas intermediárias, e envolve falhas por propagação lenta de fissuras (ruptura frágil). E no estágio III, o material, submetido a cargas baixas, apresenta falha por oxidação devido ao consumo do pacote de aditivos. (THOMAS; CUTTINO, 2011). Como os tubos objeto deste estudo conduzem as águas pluviais por gravidade, ou seja, não trabalham pressurizados, as tensões a que são submetidos durante a sua vida útil dificilmente conduzirão a uma falha do estágio I. Adicionalmente, as falhas do estágio III podem ser prevenidas com a adição adequada de antioxidantes e pigmentos. Assim, no presente estudo as avaliações se concentraram nas falhas ocorridas no estágio II, onde a presença de possíveis concentradores de tensões provenientes do polietileno reciclado pode afetar o desempenho dos tubos.

De acordo com Pluimer (2016), no estágio II, o tempo total para a ocorrência de falhas é compreendido por duas fases: (1) o tempo para iniciação de fissuras (t_{if}) e (2) o tempo para propagação das fissuras (t_{pf}), conforme apresentado na Figura 5.

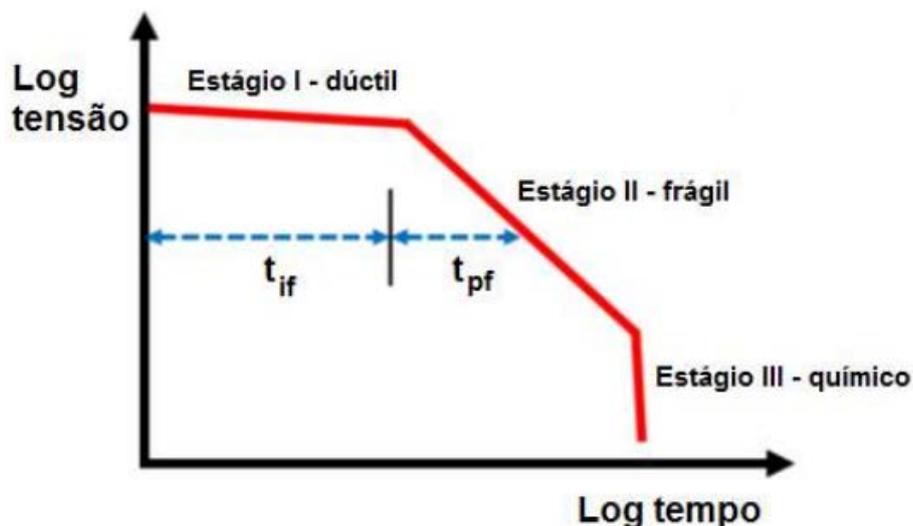


Figura 5: Curva típica dos modos de falha dos tubos de polietileno (Fonte: PLUIMER, 2016)

A partir dos resultados dos ensaios exploratórios (Atividade 2), foram escolhidas as formulações para a fabricação das amostras de tubos corrugados. Esta escolha foi realizada com base nos melhores resultados observados, principalmente em relação à resistência a propagação lenta de fissuras, teor de contaminantes e tempo de oxidação induzida. Assim, dentre as 15 formulações submetidas aos ensaios exploratórios, 3 foram escolhidas para a produção de amostras de tubos que foram fabricados no diâmetro nominal DN600, por se tratar de um dos diâmetros de maior demanda.

As amostras de tubos foram avaliadas (Atividade 3) quanto às propriedades físicas e químicas, bem como quanto ao desempenho esperado de uma tubulação enterrada para drenagem de águas pluviais.

RESULTADOS DA ETAPA 1

Poucas normas técnicas nacionais estabelecem requisitos e critérios para produtos plásticos fabricados a partir de plástico reciclado. Um dos documentos identificados foi a Norma Brasileira ABNT NBR 16033:2012 Sinalização vertical viária — Suporte polimérico de materiais reciclados — Requisitos e métodos de ensaio, que apresenta requisitos e critérios de desempenho para suportes de placas de sinalização. Em relação a normas para tubos plásticos, há a ABNT NBR ISO 21138-3:2016 que permite o uso de material reciclado e reprocessado proveniente de tubos e conexões de origem externa desde que sua especificação técnica seja conhecida e controlada.

As 15 formulações foram produzidas em laboratório e identificadas com números de 1 a 15. A Tabela 2 apresenta os percentuais de cada material das formulações avaliadas.

Tabela 2: Composição das formulações avaliadas (Fonte: Elaborado pelos autores)

Descrição do Material	Formulações (% em massa)														
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°	14°	15°
Resina Virgem 1	10	15	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10
Resina Virgem 2	0	0	0	0	0	10	15	18	25	23	0	0	13	0	0
PEAD reciclado 1	43	38	58	51	48	43	50	53	58	58	50	53	50	58	53
PEAD reciclado 2	33	0	10	45	38	0	23	15	0	15	0	0	0	0	0
PEAD reciclado 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38	43	33	0	23
PEAD reciclado 4	10	13	10	0	10	13	8	10	13	0	8	0	0	0	10
PEAD reciclado 5	0	30	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	28	0
Pigmento	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

As formulações foram elaboradas utilizando-se combinações de materiais provenientes de 2 tipos de resina de PEAD virgem, 5 diferentes lotes de PEAD reciclado ou reprocessado, e um lote de pigmento.

Os ensaios de determinação da densidade aparente, índice de fluidez, módulo de flexão, tensão de escoamento na tensão, alongamento na ruptura, teor de negro de fumo, resistência à propagação lenta de fissuras com entalhe, tempo de oxidação reduzida, teor de cinzas e teor de polipropileno foram realizados para caracterizar e conhecer as principais propriedades destas 15 formulações. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados da avaliação das formulações – valores médios (Fonte: Elaborado pelos autores)

Ensaio	Formulações														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Determinação da densidade aparente (g/cm ³)	0,953	0,953	0,953	0,954	0,955	0,951	0,954	0,952	0,952	0,951	0,953	0,953	0,953	0,951	0,954
Determinação do índice de fluidez - 190°C/5 kg (g/10 min)	0,72	0,58	0,7	0,83	0,85	0,74	0,88	0,92	0,94	0,91	0,58	0,55	0,62	0,67	0,59
Módulo de elasticidade em flexão (MPa)	904	716	748	725	762	887	768	813	801	997	916	874	852	908	1003
Resistência à tração (MPa)	31,0	29,0	30,0	30,0	30,0	29,0	29,3	31,0	29,3	30,0	33,0	33,7	31,0	31,0	32,0
Teor de negro de fumo (%)	3,3	3,9	3,0	2,8	4,2	3,7	3,1	2,8	4,0	3,1	3,8	3,4	2,8	2,6	2,4
Propagação lenta de trincas – NCLS (horas)	19,4	34,6	11,2	>24*	16,4	>24*	>24*	35,4	>24*	>24*	>24*	>24*	22	>24*	67,6
Tempo de oxidação induzida (min)	13	34	18	9,5	9,5	34	14	16	20	18,5	10,5	10,5	14	33	14
Teor de cinzas (%)	0,90	0,61	0,86	0,80	1,00	0,71	0,93	0,88	0,82	0,85	0,91	0,90	0,82	0,77	0,92
Teor de polipropileno (%)	6,1	5,3	5,6	7,7	2,5	8,3	6,2	5,1	5,0	7,1	7,3	2,3	4,7	4,5	5,5

*Os valores indicados como “>24” correspondem aos ensaios que tiveram que ser interrompidos ao atingir 24 horas, ou seja, foram encerrados antes da ocorrência de ruptura.

A partir da análise dos resultados da Tabela 3, as formulações identificadas como 2, 9 e 14 foram escolhidas para a fabricação dos tubos para a realização dos ensaios. De cada formulação, foram produzidas 3 barras de 6 metros de comprimento e diâmetro nominal DN600, com ponta e bolsa (vide Figura 6).



Figura 6: Produção de tubos para a realização do estudo (Fonte: Elaborado pelos autores)

A Tabela 4 apresenta os principais resultados das amostras de tubos avaliadas na Atividade 3.

Tabela 4 – Principais resultados da avaliação dos tubos produzidos na Atividade 3 (Fonte: Elaborado pelos autores)

Ensaio realizado	Método	Formulação 2	Formulação 9	Formulação 14
Rigidez anelar	ISO9969:2016	6,3 kN/m ²	7,4 kN/m ²	6,4 kN/m ²
Resistência ao achatamento*	*	Sem falhas	Sem falhas	Sem falhas
Resistência ao impacto	ASTM D2444-99	Sem falhas	Sem falhas	Sem falhas
Comportamento ao calor	ISO12091:1995	Sem falhas	Sem falhas	Sem falhas
Estanqueidade da junta	ASTM D3212-07	Estanque	Estanque	Estanque
Fissuramento sob tensão com entalhe (NCLS)	ASTM F2136-08	45 horas	50 horas	57 horas
Fissuramento sob tensão sem entalhe (UCLS)	ASTM F3181-16	189 horas	29 horas	328 horas
Tempo de oxidação induzida	ISO11357-6:2008	26 minutos	3 minutos	13 minutos
Coeficiente de fluência	ISO9967:2016	3,0	3,1	3,1

*realizado após ensaio de rigidez anelar, com mesma velocidade de compressão até 40% do diâmetro interno

Os resultados dos ensaios realizados na Atividade 3 mostraram que as amostras de tubos apresentaram rigidez anelar compatível com a rigidez apresentada pelos tubos corrugados produzidos com resina de PEAD virgem, sendo o mesmo constatado para a resistência ao impacto, desempenho da junta elástica, achatamento e comportamento ao calor. Ou seja, as propriedades mecânicas e desempenho dos tubos apresentaram resultados satisfatórios.

Em relação aos resultados das avaliações referentes aos Estágios II e III da curva típica de falhas dos tubos de polietileno (Figura 5), foi verificado que todas as 3 amostras apresentaram resultados satisfatórios na resistência sob tensão com entalhe e no ensaio de determinação do coeficiente de fluência. Duas das amostras apresentaram valores muito superiores ao mínimo exigido para a resistência ao fissuramento sob tensão sem entalhe e apenas uma apresentou o tempo de oxidação induzida satisfatório. Esta última constatação indica a necessidade de complementar a aditivação com estabilizante térmico de forma a atender ao valor mínimo de 20 minutos para duas das amostras analisadas.

ETAPA 2: DEFINIÇÃO DE REQUISITOS E CRITÉRIOS MÍNIMOS

Desta forma, é de fundamental importância que os requisitos e critérios mínimos a serem estabelecidos garantam o desempenho adequado dos tubos corrugados de polietileno de alta densidade com PEAD reciclado incorporado durante toda a sua vida útil. No entanto, uma vez que o histórico de aplicação desse tipo de tubo em território nacional ainda é limitado, faz-se necessária uma abordagem conservadora, visando evitar/minimizar falhas inesperadas do material. A drenagem pluvial de áreas internas de empreendimentos residenciais e comerciais foi selecionada para a aplicação inicial destes tubos pelos motivos a seguir elencados:

- As tubulações para drenagem pluvial conduzem as águas pluviais apenas por gravidade;
- As águas pluviais provenientes de áreas internas a empreendimentos residenciais e comerciais, a princípio, não contém agentes químicos que poderiam causar a degradação do material;
- Em sistemas de drenagem de águas pluviais de rodovias e ferrovias, as tubulações estão sujeitas a carregamentos cíclicos de grande intensidade. Em áreas internas a empreendimentos residenciais e comerciais as cargas mecânicas apresentam menor intensidade e estão submetidas a um número menor de ciclos de carregamento.

Assim, a definição dos requisitos e critérios mínimos partiu do princípio de que os tubos, objeto deste estudo, devem apresentar o mesmo desempenho dos tubos corrugados de PEAD fabricados com resina virgem para drenagem de águas pluviais. Adicionalmente, foram selecionados requisitos mínimos para o composto de PEAD

reciclado bem como para a verificação do desempenho de longo prazo do tubo acabado. Além dos resultados obtidos nas Atividades 2 (ensaios exploratórios realizados em 15 formulações) e 3 (ensaios em amostras de tubos), foram avaliados também os resultados obtidos pelo estudo desenvolvido pelo NCHRP, descritos nos Relatórios 696 e 870, publicados em 2011 e 2018, respectivamente.

RESULTADOS DA ETAPA 2

A Tabela 5 apresenta de forma sucinta, os requisitos e critérios recomendados para os tubos corrugados objeto deste estudo.

Tabela 5 – Resumo dos requisitos para tubos corrugados com PEAD reciclado incorporado (Fonte: Elaborado pelos autores)

Produto alvo	Propriedades a serem verificadas	Descrição resumida
PEAD reciclado	Qualidade	Homologação dos fornecedores e controles de recebimento
	Caracterização	No mínimo densidade, índice de fluidez, teor de polipropileno
	Toxicidade	Verificação da presença de substâncias nocivas ao meio ambiente
Composto	Caracterização	Determinação da densidade, índice de fluidez, módulo de flexão, tensão de escoamento na tração, tempo de oxidação induzida e verificação da resistência química.
	Contaminantes	Teor de negro de fumo, teor de cinzas e teor de polipropileno
Tubos	Características visuais	Análise do aspecto visual do tubo e marcação indelével.
	Dimensional	Diâmetro interno, espessura de parede da parede interna e comprimento
	Características físicas e mecânicas	Rigidez anelar, achatamento, comportamento ao calor, resistência ao impacto, estanqueidade e fissuramento sob tensão com entalhe
	Durabilidade	Resistência ao fissuramento sob tensão sem entalhe
	Resistência química	Verificação da resistência a agentes químicos

Recomenda-se a homologação dos fornecedores de PEAD reciclado, bem como o controle da qualidade dos lotes de matéria-prima recebidos, no mínimo, por meio da realização dos ensaios de determinação da densidade, índice de fluidez e teor de polipropileno. Caso a origem do PEAD reciclado seja desconhecida, torna-se necessária também a realização de uma verificação de toxicidade conforme o Anexo A da Diretriz SINAT nº13 (BRASIL, 2018).

Os requisitos, critérios mínimos e métodos de ensaio propostos para o composto e tubos corrugados de PEAD para drenagem de águas pluviais são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Requisitos, critérios mínimos e métodos propostos para o composto e tubos corrugados com PEAD reciclado incorporado (Fonte: Elaborado pelos autores)

Requisito	Critério mínimo e métodos de ensaio
Características do composto	
Densidade	Entre 0,947 g/cm ³ e 0,955 g/cm ³ (ASTM D792-13 / ISO 1183-1:2012)
Índice de fluidez	Índice de Fluidez ≤ 1,6 g/10 min (5 kg / 190 °C - ASTM D1238-13)
Módulo de flexão	Módulo de flexão: ≥ 758 MPa (ASTM D790-17)
Tensão de escoamento na tração	Tensão de escoamento na tração ≥ 21 MPa (ASTM D638-14)
Teor de negro de fumo	Teor de negro de fumo entre 2 % a 4 %
Teor de cinzas	Teor de cinzas < 2 % (800 °C - ASTM D1603-14)
Teor de polipropileno	Teor de polipropileno ≤ 5 % (ISO 18263-2:2015)
Tempo de oxidação induzida	Tempo de oxidação induzida ≥ 20 minutos (200 °C - NBR 14300:1999 / ISO 11357-6:2008)
Resistência química	A variação de até 20% entre os valores da tensão máxima e o alongamento máximo de corpos de prova expostos e não expostos a agentes químicos, conforme Anexo B da Diretriz SINAT nº13.
Características dimensionais e visuais do tubo	
Análise visual	As superfícies dos tubos devem ter aspecto uniforme e serem isentas de corpos estranhos, bolhas, rachaduras ou outros defeitos visuais que indiquem descontinuidade do composto ou do processo de extrusão.
Marcação	Indelével, em intervalos máximos de 2 metros, com as seguintes informações: nome e/ou marca do fabricante, diâmetro nominal, rigidez anelar nominal, “PE”, os dizeres: “ <i>contém PE reciclado</i> ”, código de rastreabilidade
Análise dimensional	Verificação do diâmetro interno mínimo e espessura mínima da parede interna (ISO 3126:2005)
Características mecânicas, desempenho e durabilidade	
Rigidez anelar	Para DN ≤ 500: SN4, SN8 ou SN16; Para DN > 500: SN2, SN4, SN8 ou SN16, onde “SN” é a rigidez nominal (ISO9969:2016)
Achatamento	Os tubos não podem apresentar ruptura, fissura, separação entre as corrugações externa e a parede interna, ou combinação destas falhas. (realizado logo após o ensaio de rigidez anelar, com compressão até 40% do diâmetro interno)
Resistência ao impacto	Os tubos não devem apresentar quebra, fissura ou separação das paredes - energia de impacto 136 J a -4 °C (ASTM D2444:1999)
Verificação do comportamento ao calor	Os tubos não devem apresentar delaminações, fissuras ou bolhas (110 °C por 30 minutos - ISO 12091:1995)
Ensaio de estanqueidade para qualificação do projeto da junta	A junta não deve apresentar sinais de vazamento (ASTM D3212-13).
Verificação da estanqueidade da junta	A junta não deve apresentar sinais de vazamento (ASTM D3212-13).
Fissuramento sob tensão com entalhe (<i>notched constant ligament stress - NCLS</i>)	O tempo médio de falha deve ser de no mínimo 24 horas sendo que nenhum corpo de prova deve apresentar tempo de falha menor que 17 horas. (ASTM F2136-08)
Fissuramento sob tensão sem entalhe (<i>un-notched constant ligament stress - UCLS</i>)	O tempo médio de falha de cinco corpos de prova deve ser de no mínimo 34 horas sendo que nenhum corpo de prova deve apresentar tempo de falha menor que 18 horas. (ASTM F3181-16)

Para o composto utilizado na fabricação dos tubos propõe-se incluir e manter os mesmos teores mínimos permitidos de negro de fumo, cinzas e polipropileno estabelecidos pela ASTM F2648-13. Tratam-se de verificações relativamente simples para determinar a presença de contaminantes que podem prejudicar o desempenho mecânico dos tubos. O ensaio de tempo de oxidação induzida foi proposto com o objetivo garantir que os tubos apresentem um tempo de pelo menos 20 minutos como resultado do ensaio (valor mínimo típico adotado para os tubos de polietileno de parede maciça) com o intuito de prevenir falhas prematuras no estágio III (vide Figura 5). Apesar dos tubos alvo deste estudo conduzirem apenas águas pluviais, propõe-se também a realização da verificação da resistência a determinados agentes químicos no caso de uma eventual contaminação da rede de água pluviais.

Os requisitos para a verificação dos tubos são equivalentes aos especificados para os fabricados com resina de PEAD virgem: rigidez anelar, resistência ao achatamento, resistência ao impacto, comportamento ao calor e desempenho da junta elástica.

Devido a possibilidade da presença possíveis contaminantes oriundos do PEAD reciclado, foi proposta a inclusão de verificações da resistência ao fissuramento sob tensão com entalhe (NCLS - *notched constant ligament stress*) e sem entalhe (UCLS – *un-notched constant ligament stress*) nos corpos de prova extraídos dos tubos.

O ensaio de resistência ao fissuramento sob tensão com entalhe (NCLS) determinará o tempo para propagação das fissuras (vide t_{pf} da Figura 5) uma vez que o entalhe previsto pelo método de ensaio reproduz artificialmente o início de uma fissura (PLUIMER, 2016). Trata-se de um requisito já especificado pela ASTM F2648-13 onde a média do tempo de falha de 5 corpos de prova deve ser maior que 12 h, sendo que nenhum corpo de prova deve falhar (romper) em menos de 9 h. Já a ASTM F2306-14, norma tubos corrugados de dupla parede de polietileno não pressurizados para drenagem subterrânea e coleta de água pluviais, fabricados em resina de PE virgem, estabelece que a média do tempo de falha deve ser maior que 24 h, e nenhum corpo de prova deve falhar em menos de 17 h. Por tratar-se de um produto novo no Brasil, este estudo propôs conservadoramente o mesmo critério da ASTM F2306-14 para o ensaio de NCLS.

O ensaio de verificação da resistência ao fissuramento sob tensão sem entalhe (UCLS) foi desenvolvido por estudos do NCHRP e, diferentemente do ensaio de fissuramento sob tensão com entalhe, avalia também o tempo para iniciação das fissuras (vide t_{if} da Figura 5). É um ensaio que utiliza os mesmos dispositivos do ensaio de fissuramento sob tensão com entalhe (NCLS), porém os corpos de prova são diferentes (maiores e sem entalhe) e é utilizada água no lugar da solução surfactante.

De acordo com Pluimer (2018), a fase para iniciação das fissuras é a mais importante para os tubos de PEAD fabricados com material reciclado pois estes apresentam maior probabilidade de conter contaminantes, vazios ou outros concentradores de tensões do que as resinas virgens. Em seu estudo finalizado em 2018 (*NCHRP Research Report 870*), Pluimer validou um modelo para prever o desempenho de longa duração do material dos tubos de PEAD com base no ensaio de UCLS, aplicando-o em múltiplas temperaturas e tensões, e adotando os princípios de superposição de tempo-temperatura e deslocamento bidirecional. Com base no modelo desenvolvido, o autor deste estudo determinou que a amostra extraída do tubo analisado deve apresentar pelo menos a média do tempo de falha maior que 34 h, e nenhum corpo de prova deve falhar em menos de 18 h (tensão de projeto 3,45 MPa). Este critério mínimo corresponde ao tempo de serviço de 100 anos a 23 °C.

CONCLUSÕES

Estudos desenvolvidos nos Estados Unidos comprovaram que tubos corrugados com PEAD reciclado incorporado podem apresentar desempenho compatível ao dos tubos fabricados com resina de polietileno virgem. Neste país, estes tubos já são fabricados tendo como referência a norma ASTM F2648, cuja primeira publicação foi realizada há mais de 10 anos, e onde estudos recentes recomendam sua aplicação também em drenagem de rodovias e ferrovias (*NCHRP Research Report 870*). Os resultados obtidos pelo estudo apresentado neste artigo confirmaram a possibilidade do uso de PEAD reciclado na fabricação de tubos corrugados para drenagem de águas pluviais, sendo necessário no entanto, o estabelecimento de requisitos e critérios mínimos para garantir que apresentarão desempenho adequado durante a sua vida útil. Devido ao fato de ser um produto inovador no Brasil com um histórico de aplicação a ser construído, recomenda-se a

utilização destes tubos apenas para drenagem de águas pluviais e uso restrito a áreas internas de empreendimentos residenciais e comerciais, tais como condomínios, conjuntos comerciais, escritórios, estacionamentos, etc, desde que atendidos os requisitos e critérios mínimos aqui propostos. Com o desenvolvimento de novos estudos e formação de um histórico positivo de aplicação, estes tubos poderão ser utilizados para a drenagem de águas pluviais em outros tipos de ocupação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO M 294: Standard Specification for Corrugated Polyethylene Pipe, 300- to 1500-mm (12- to 60-in.) Diameter. Washington: AASHTO, 2018. 22 p.
2. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO M 294: Standard Specification for Corrugated Polyethylene Pipe, 300- to 1500-mm (12- to 60-in.) Diameter. Washington: AASHTO, 2017. 21 p.
3. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 2321: Standard Practice for Underground Installation of Thermoplastic Pipe for Sewers and Other Gravity-Flow Applications. West Conshohocken: ASTM, 2014. 12 p.
4. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 2444: Standard Test Method for Determination of the Impact Resistance of Thermoplastic Pipe and Fittings by Means of a Tup (Falling Weight). West Conshohocken: ASTM, 1999. 8 p.
5. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 3212: Joints for Drain and Sewer Plastic Pipes Using Flexible Elastomeric Seals. West Conshohocken: ASTM, 2007. 3 p.
6. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D2321: Standard Practice for Underground Installation of Thermoplastic Pipe for Sewers and Other Gravity-Flow Applications. West Conshohocken: ASTM, 2014. 12 p.
7. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. F2136: Notched, Constant Ligament - Stress (NCLS) Test to Determine Slow-Crack-Growth Resistance of HDPE. West Conshohocken: ASTM, 2008. 5 p.
8. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. F2648: Standard Specification for 2 to 60 inch [50 to 1500 mm] Annular Corrugated Profile Wall Polyethylene (PE) Pipe and Fittings for Land Drainage Applications. West Conshohocken: ASTM, 2013. 8 p.
9. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. F3181: The Un-notched, Constant Ligament Stress Crack Test (UCLS) for HDPE Materials Containing Post-Consum. West Conshohocken: ASTM, 2016. 5 p.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 21138-3: Sistemas de tubulações plásticas para drenagem e esgoto subterrâneos não pressurizados - Sistemas de tubos com paredes estruturadas de policloreto de vinila não plastificado (PVC-U), polipropileno (PP) e polietileno (PE). Parte 3: Tubos e conexões com a superfície externa não lisa, Tipo B. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 54 p.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16033:2012: Sinalização vertical viária — Suporte polimérico de materiais reciclados — Requisitos e métodos de ensaio. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 13 p.
12. BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional da Habitação. DIRETRIZ SINAT nº13: Tubulações corrugadas de polietileno contendo polietileno de alta densidade reciclado para microdrenagem de áreas internas de empreendimentos residenciais e comerciais. Brasília: Ministério das Cidades, 2018. 28 p. Disponível em: <http://pbqp-h.cidades.gov.br/projetos_sinat.php>. Acesso em: 01 maio 2018.
13. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN ISO 9967: Thermoplastics pipes - Determination of creep ratio. 3 ed. Bruxelas: CEN, 2016. 19 p.
14. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN ISO 9969: Thermoplastics pipes - Determination of ring stiffness. 3 ed. Bruxelas: CEN, 2016. 14 p.
15. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 12091: Structured-wall thermoplastics pipes - Oven test. 1 ed. Geneve: Iso, 1995. 5 p.
16. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (Brasil). Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Estado de São Paulo (Ed.). Relatório técnico Nº 148 795-205. São Paulo: IPT, 2016. 89 p



17. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (Brasil). Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Estado de São Paulo. Relatório técnico N° 150 040-205. São Paulo: IPT, 2017. 64 p.
18. KURDZIEL, John M. Required Engineering Properties for High Density Polyethylene Pipe Utilizing Recycled Materials. In: PLASTIC PIPES CONFERENCE, 17., 2014, Chicago. Proceedings... . Chicago: PPCA, 2014. p. 1 - 8.
19. PLUIMER, M. L. Evaluation of Corrugated HDPE Pipes Manufactured with Recycled Content in Commuter Rail Applications. Dissertação. Villanova, PA: Proquest, 2016.
20. PLUIMER, Michael et al. NCHRP Research Report 870 Field Performance of Corrugated Pipe Manufactured with Recycled Polyethylene Content. Washington: National Academy Of Sciences, 2018. 158 p. Disponível em: <<https://www.nap.edu/catalog/24934/field-performance-of-corrugated-pipe-manufactured-with-recycled-polyethylene-content>>. Acesso em: 06 jan. 2018.
21. THOMAS, Richard W.; CUTTINO, David. NCHRP Report 696 Performance of Corrugated Pipe Manufactured with Recycled Polyethylene Content. Washington: National Academy of Sciences, 2011. 140 p. Disponível em: <<https://www.nap.edu/catalog/14570/performance-of-corrugated-pipe-manufactured-with-recycled-polyethylene-content>>. Acesso em: 06 abr. 2017.