DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/14

A Influência da Variabilidade dos Parâmetros de Solda na Instalação de Geomembranas de PEAD.

Sergio Luiz da Costa Junior
Consultor Técnico, Nortène Plásticos, Jundiaí, Brasil, sergio.costa@nortene.com.br

Patrícia Natalí Ferreira
Consultora Técnica, Nortène Plásticos, Porto Alegre, Brasil, patricia.ferreira@nortene.com.br

Andreia Rodrigues Machado
Consultora Técnica, Nortène Plásticos, Porto Alegre, Brasil, andreia.machado@nortene.com.br

RESUMO: As geomembranas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) estão sendo cada vez mais utilizadas na construção de barragens, pilhas e reservatórios de água, devido à sua função de barreira. As geomembranas são fabricadas em painéis e, no campo, é feita sua instalação por meio de sobreposição de 15 cm e fixação por termofusão. Portanto, as soldas das geomembranas tornam-se o elemento mais crítico para garantir a estanqueidade dos sistemas de barreira, pois, mesmo que as geomembranas apresentem excelentes propriedades hidráulicas, uma falha na solda pode comprometer totalmente o sistema. Temperatura, pressão e velocidade são os parâmetros de calibração dos equipamentos de solda por termofusão das geomembranas. Esses parâmetros controlam diretamente a qualidade da solda e precisam ser ajustados e monitorados durante as obras, em função da espessura do material e das condições ambientais. Este trabalho tem como objetivo verificar a influência da temperatura, da pressão e da velocidade na qualidade da solda. Em ambiente controlado, foram realizadas soldas por termofusão em tiras de geomembranas de PEAD, variando esses parâmetros. Após a execução das soldas, corpos de prova foram talhados e submetidos aos ensaios de cisalhamento e descolamento em um tensiômetro, para avaliar a resistência da solda. Conclui-se que a velocidade e a temperatura são os parâmetros que mais afetam a qualidade da solda, assim, identificar em campo o conjunto mais eficiente permitirá garantir a integridade das juntas soldadas.

PALAVRAS-CHAVE: Geomembrana, Instalação, Parâmetros de Solda, Termofusão

ABSTRACT: High-Density Polyethylene (HDPE) geomembranes are being increasingly used in the construction of dams, stockpiles, and water reservoirs due to their barrier function. Geomembranes are manufactured in panels, and their field installation is performed through a 15 cm overlap and fixed by thermal fusion. Therefore, geomembrane seams become the most critical element to ensure the watertightness of barrier systems because, even if the geomembranes exhibit excellent hydraulic properties, a seam failure can completely compromise the system. Temperature, pressure, and speed are the calibration parameters for thermal fusion welding equipment. These parameters directly control seam quality and must be adjusted and monitored during construction, depending on material thickness and environmental conditions. This study aims to verify the influence of temperature, pressure, and speed on seam quality. In a controlled environment, thermal fusion welds were performed on HDPE geomembrane strips by varying these parameters. After welding, specimens were cut and subjected to shear and peel tests in a tensiometer to evaluate seam strength. It is concluded that speed and temperature are the parameters that most affect seam quality; thus, identifying the most efficient set in the field will ensure the integrity of the welded joints.

KEYWORDS: Geomembrane, Installation, Welding Parameters, Thermal Fusion.

1 INTRODUÇÃO

Scheirs (2009) explica que as geomembranas de PEAD ganharam populariedades no inicio das década de 80 devido a sua alta resistência química e facilidade de soldar as geomembranas com processos termicos

ao invés de processos químicos, como nas geomembranas de PVC. Logo, a crescente demanda por soluções seguras e ambientalmente adequadas em obras geotécnicas tem impulsionado o uso de sistemas de barreira com geomembranas, especialmente em aplicações como barragens, pilhas de rejeito, aterros sanitários e reservatórios. Nesse contexto, as geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) destacam-se por sua baixa permeabilidade, elevada resistência química e durabilidade, sendo amplamente utilizadas como elementos de barreiras. Segundo Scheirs (2009), o desempenho desses sistemas está diretamente relacionado à integridade do material polimérico e, sobretudo, à qualidade das juntas soldadas, que representam pontos potencialmente críticos quanto à estanqueidade e ao comportamento mecânico global do sistema.

Solda por termofusão é o principal método empregado na união de painéis de geomembranas em campo e em fábrica, sendo considerada uma etapa determinante para o desempenho do sistema de impermeabilização. Conforme estabelecido pela ABNT NBR 16199:2020, o processo consiste na sobreposição dos painéis e na aplicação controlada de calor, pressão e velocidade por meio de equipamentos específicos, de modo a promover a fusão adequada do material e garantir a continuidade hidráulica e estrutural da barreira . A variabilidade desses parâmetros operacionais, no entanto, pode influenciar significativamente a qualidade da solda, tornando essencial o controle rigoroso do processo.

De acordo com Koerner (2012), a resistência mecânica das juntas soldadas deve ser equivalente ou superior à do próprio material base, sendo comumente avaliada por ensaios de cisalhamento e descolamento. O autor destaca que desvios nos parâmetros de soldagem, como temperaturas inadequadas ou velocidades incompatíveis com a espessura da geomembrana, podem resultar em defeitos como soldas frias ou degradadas, comprometendo a integridade do sistema.

Geosynthetics Institute (GRI GM19a) reforça a importância da calibração dos parâmetros operacionais em função das condições específicas de cada obra, incluindo espessura da geomembrana, condições ambientais e características do equipamento. Tais recomendações evidenciam que não existe um único conjunto de parâmetros universalmente aplicável, sendo necessária a realização de ensaios preliminares para definição das condições ótimas de soldagem. De forma complementar, o Bulletin 135 do ICOLD (2010) ressalta que falhas em sistemas de vedação frequentemente estão associadas a deficiências na execução das juntas, e não ao material em si, reforçando a criticidade do controle tecnológico nessa etapa.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo central avaliar a janela de soldabilidade para geomembranas de PEAD de espessura 1,0 mm, analisando a influência da variabilidade dos parâmetros operacionais (temperatura e velocidade) na integridade mecânica das juntas soldadas, visando garantir a estanqueidade e a segurança de sistemas de barreira em obras geotécnicas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Local de Estudos

O presente estudo foi realizado em Manaus (AM), nas dependências da unidade industrial da empresa produtora de geomembranas EZGEO, pertencente ao Grupo Nortène. Nessa unidade, foram utilizadas geomembranas íntegras, obtidas diretamente da linha de produção, sem a ocorrência de danos ou processos degradativos associados ao transporte, às operações em campo ou às variações térmicas.

2.2 Caracterização da Geomembrana

Para este trabalho, foram utilizadas três amostras de geomembranas de PEAD (polietileno de alta densidade), com espessura de 1,00 mm. As caracterizações físicas e mecânicas das geomembranas foram realizadas conforme os parâmetros estabelecidos pela norma GRI GM-13 (2019). A Tabela 1 lista as propriedades ensaiadas, as suas respectivas normas e os valores encontrados. Os ensaios mecânicos de tração, perfuração e rasgo foram realizados em uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, dentro do laboratório de qualidade da empresa Nortène Plástico LTDA.

Tabela 1. Propriedades da Geomembrana

Propriedade	Método	GM 1	GM-2	GM-3	Média
Espessura	ASTM D 5994	1,03	1,03	1,02	1,027
Densidade	ASTM D1505	0,943	0,944	0,951	0,946
Resistência à Tração - Tensão no Escoamento	ASTM D6693	16,43	17,23	18,17	17,28
Resistência à Tração - Tensão na Ruptura		31,78	32,72	31,34	31,95
Resistência à Tração - Alongamento Escoamento		15,33	15,8	15,58	15,57
Resistência à Tração - Alongamento Ruptura		807,6	789,1	736	777,57
Resistência ao rasgo	ASTM D1004	145	153,5	162,1	153,53
Resistência à perfuração	ASTM D4833	421,23	428,25	455,66	435,05
Teor de negro de fumo	ASTM D4218	2,41	2,77	2,67	2,62

Conforme apresentado na Tabela 1, todas as propriedades avaliadas da geomembrana encontram-se superiores aos valores estipulados pela GM-13.

2.2 Soldas por Termofusão

Para a realização dos ensaios, as soldas por termofusão foram executadas em ambiente fabril controlado, utilizando geomembranas recém-produzidas, sem interferências de campo. Os painéis foram sobrepostos e soldados com termofusora automática de cunha quente COMET da marca LEISTER, que permite a variação da temperatura entre 0,80m/min e 3,2m/min, variação na temperatura entre 280 e 420 graus celcius e pressão até 1000N. Foram realizados ajustse prévio dos parâmetros de temperatura, pressão e velocidade, definidos a partir de soldas de calibração. As condições ambientais foram mantidas estáveis ao longo do processo, garantindo repetibilidade.

Após a execução das soldas, realizou-se inspeção visual preliminar para verificação de possíveis descontinuidades, defeitos superficiais ou irregularidades no cordão de solda. Em seguida, foram retiradas amostras para a realização dos ensaios de avaliação da resistência e integridade das juntas. Foram analisadas a resistência ao cisalhamento e ao descolamento, conforme a ASTM D6392, máquina universal de ensaios da marca EMIC. A Figura 1 apresenta ensaio de descolamento sendo realizado.



Figura 2 – Ensaio de Descolamento

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 apresenta os valores encontrados nos ensaios de solda por termofusão, com a variação das propreidades de solda: temperatura, pressão e velocidade.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de solda

Teste	Temperatura (ºc)	Velocidade (m/min.)	Pressão	Observação	Cisalhamento (N/25mm)	Descolamento (N/25mm)
T1	280	0.80	3.0	Queimada	NA	NA
T2	280	1.0	3.0	Queimada	NA	NA
T2.1	280	1.0	2.5	Queimada	NA	NA
T2.2	280	1.0	1.0	Queimada	NA	NA
T3	280	1.5	3.0	Ok	416,8	359,0
T7	280	3.2	3.0	Ok	391,6	361,2
T8	300	0.80	3.0	Queimada	NA	NA
T9	300	1.0	3.0	Queimada	NA	NA
T10	300	1.5	3.0	Ok	405,9	380,4
T14	300	3.2	3.0	Ok	391,3	355,0
T15	320	0.80	3.0	Queimada	NA	NA
T16	320	1.0	3.0	Queimada	NA	NA
T17	320	1.5	3.0	Ok	406,3	362,1
T21	320	3.2	3.0	Ok	400,1	374,8
T22	340	0.80	3.0	Queimada	NA	NA
T23	340	1.0	3.0	Queimada	NA	NA
T24	340	1.5	3.0	Ok	404	370,2
T28	340	3.2	3.0	Ok	380	359,1
T29	360	0.80	3.0	Queimada	NA	NA
T30	360	1.0	3.0	Queimada	NA	NA
T31	360	1.5	3.0	Ok	389,9	358,5
T35	360	3.2	3.0	Ok	410	378,7
T36	380	0.80	3.0	Queimada	NA	NA
T37	380	1.0	3.0	Queimada	NA	NA
T38	380	1.5	3.0	Ok	393,3	354,0
T42	380	3.2	3.0	Ok	424,3	381,9
T43	400	0.80	3.0	Queimada	NA	NA
T44	400	1.0	3.0	Queimada	NA	NA
T45	400	1.5	3.0	Ok	413,7	335,7
T49	400	3.2	3.0	Ok	404	362,0
T50	420	0.80	3.0	Queimada	NA	NA
T50.1	420	0.80	1.0	Queimada	NA	NA
T51	420	1.0	3.0	Queimada	NA	NA
T51.1	420	1.0	2.5	Queimada	NA	NA
T51.1	420	1.0	1.0	Queimada	NA	NA
T52	420	1.5	3.0	Queimada	NA	NA
T52.1	420	1.5	2.5	Queimada	NA	NA
T53	420	2.0	3.0	Ok	402,1	339,3
T55	420	3.2	3.0	Ok	412,3	362,7

Os resultados obtidos permitem uma análise consistente da influência dos parâmetros de soldagem, como temperatura e velocidade, no desempenho mecânico das juntas de geomembrana de PEAD com

espessura nominal de 1,0 mm, evidenciando forte correlação entre a janela de soldabilidade definida e a qualidade estrutural das soldas.

2.1. Janela de Soldabilidade

A análise experimental permitiu mapear a correlação entre temperatura, velocidade e pressão, consolidando a "janela de soldabilidade" para a geomembrana de PEAD. De forma geral, observa-se que as combinações de parâmetros situadas dentro da janela operacional proposta entre 280 e 400 °C, com velocidade variando entre 1,5 e 3,2 m/min resultaram em soldas com desempenho mecânico satisfatório, atendendo integralmente aos requisitos estabelecidos pelas normas GRI GM19a e ABNT NBR 16199.

2.1.1 Degradação por Excesso de Energia (Burn-through)

Amostras submetidas a baixas velocidades (≤ 1,0 m/min) com temperaturas acima de 280°C resultaram em falhas, queimando os material. Isso ocorre porque o tempo de exposição térmica excedeu a capacidade de absorção do polímero, levando à degradação térmica e perda de seção transversal, o que invalida a solda mecanicamente.

2.1.2 Zona de Operação Segura

A janela ideal de operação validada situa-se no intervalo de temperatura de 280°C a 420°C, com velocidades variando entre 1,5 e 3,5 m/min. Dentro desta faixa de valores, a elevação da temperatura localizada permitiu o entrelaçamento das cadeias poliméricas sem comprometer a estrutura molecular do material base, ou seja, permitiu que a solda da geomembrana acontece, sem que houvesse perda na qualidade dos parâmetros desejados e sem que houvesse dano aos materiais.
A Figura 2 apresenta a janela de soldabilidade, destacando que as geomembranas de PEAD possuem no geral, uma ampla janela de soldabilidade e que os parâmetros de solda escolhidos dentre a faixa verde destacada são adequadas para o material, corroborando os fundamentos físico-químicos da soldagem por fusão de polímeros, nos quais a coalescência das cadeias poliméricas é maximizada em condições térmicas e cinemáticas equilibradas.

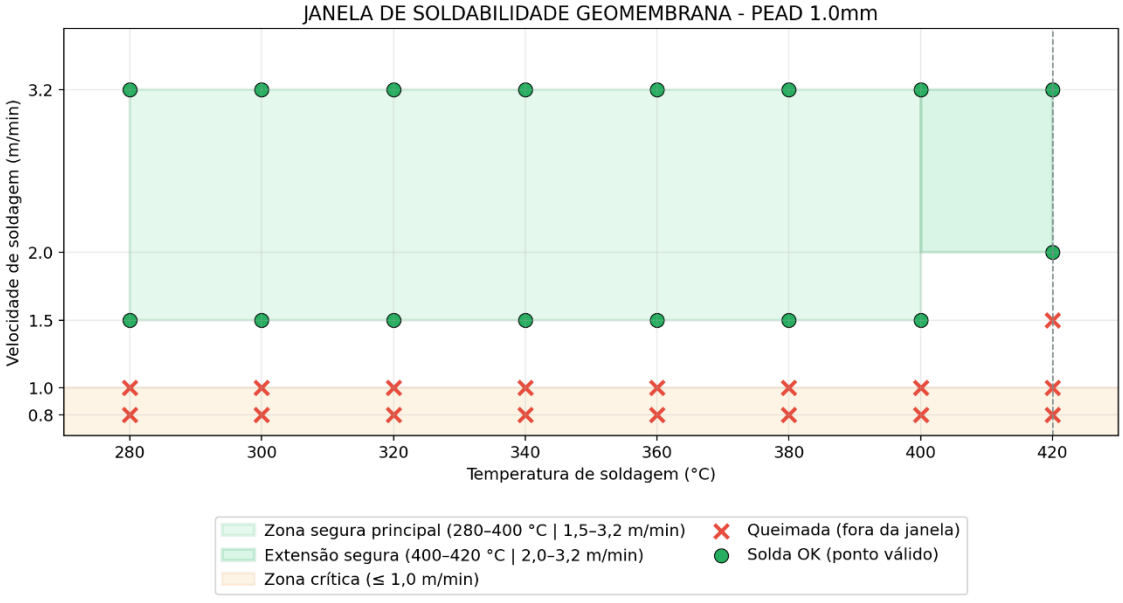


Figura 2 - Janela de Soldabilidade

Por outro lado, a análise dos pontos fora da janela de soldabilidade reforça a importância do controle operacional. Em condições de velocidades reduzidas, ou seja, velocidade inferior à 1,0 m/min,

independentemente da temperatura escolhiada, resultaram em degradação térmica do material, caracterizada como "solda queimada" da geomembrana e consequente perda de integridade do material. Esse efeito decorre do tempo excessivo de exposição ao calor, derrentando, queimando e, assim, promovendo alteração das propriedades do PEAD, o que inviabiliza a formação de uma interface estruturalmente confiável.
Outro aspecto relevante é a validação da extensão da janela para temperaturas mais elevadas (até 420 °C), desde que associadas a velocidades mínimas de 2,0 m/min. Os resultados demonstram que, nessas condições, é possível manter desempenho mecânico adequado, o que indica que o fator crítico não é apenas a temperatura isoladamente, mas sim o balanço térmico imposto pela relação temperatura × tempo de exposição (velocidade). Adicionalmente, a uniformidade dos resultados dentro da janela segura evidencia a robustez do processo de soldagem quando executado sob parâmetros controlados, refletindo baixa variabilidade e alta repetibilidade. Esse comportamento é fundamental do ponto de vista de engenharia, pois indica confiabilidade na execução e reduz a probabilidade de ocorrência de falhas localizadas ao longo das soldas.

2.2. Desempenho Mecânico: Cisalhamento e Descolamento

A análise do desempenho mecânico (Figura 3) revela que todas as amostras situadas na zona de conformidade superaram os requisitos da GRI GM19.

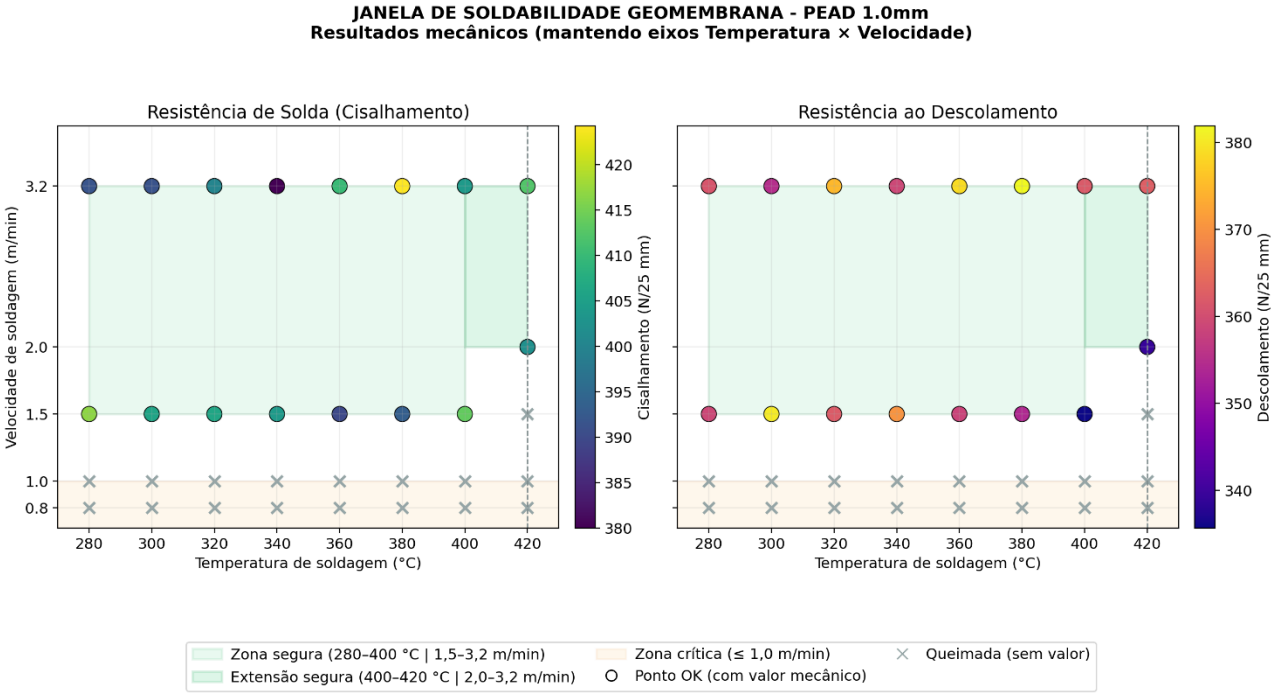


Figura 3 – Resultado dos Ensaios de Resistência ao Cisalhamento e Resistência ao Descolamento.

2.2.1 Resistência ao Cisalhamento (Shear Strength)

Todas as amostras validadas dentro da janela operacional superaram o limite mínimo de 350 N/25 mm. Destaca-se o teste T10 (300°C @ 1,5 m/min), que atingiu 405,9 N/25 mm. Em geral, os resultados apresentaram baixa dispersão e valores consistentemente superiores ao limite mínimo normativo, indicando elevada eficiência na transferência de esforços tangenciais ao longo da interface soldada. Observa-se ainda que, dentro da faixa segura, o aumento da temperatura tende a promover leve incremento nos valores de resistência, especialmente nas velocidades mais elevadas (3,2 m/min), sugerindo maior grau de fusão e entrelaçamento molecular. Entretanto, esse ganho não é ilimitado, sendo condicionado à manutenção de velocidades compatíveis que evitem degradação térmica.

2.2.2 Resistência ao Descolamento (Peel Strength)

Este parâmetro, sendo o mais crítico para avaliar a ductilidade da interface, apresentou valores consistentemente acima de 263 N/25 mm. Por exemplo, a amostra T3 (280°C @ 1,5 m/min) registrou 359 N/25 mm, garantindo que a interface soldada não seja o elo frágil do sistema de impermeabilização. De maneira complementar, os resultados de resistência ao descolamento também se mantiveram acima do valor mínimo exigido (263 N/25 mm), demonstrando que a integridade da interface soldada foi preservada em todas as condições válidas. Nota-se, porém, uma maior sensibilidade deste parâmetro às variações de temperatura, com tendência de redução em temperaturas mais elevadas quando associadas a velocidades intermediárias ou baixas. Esse comportamento pode estar relacionado a alterações microestruturais na zona de fusão, como degradação superficial ou redução da ductilidade local, fenômenos amplamente descritos na literatura para polímeros submetidos a superaquecimento.

3 CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu a delimitação técnica da janela de soldabilidade para geomembranas de PEAD de 1,0 mm, estabelecendo a correlação direta entre os parâmetros operacionais de temperatura, velocidade e pressão com a integridade mecânica das juntas. A análise sistemática dos dados laboratoriais, confrontada com os requisitos das normas GRI GM19 e ABNT NBR 16199, fundamenta as seguintes conclusões:

(1) A pesquisa confirmou que a zona segura de soldagem para o material de 1,0 mm situa-se entre 280°C e 420°C, com velocidades de 1,5 a 3,5 m/min. Fora desse envelope, o risco de falha por falta de fusão ou degradação térmica aumenta significativamente;

(2) Todas as amostras validadas dentro da janela superaram os requisitos da GRI GM19 e ABNT NBR 16199, apresentando resistências ao cisalhamento acima de 350 N/25 mm e ao descolamento superiores a 263 N/25 mm;

(3) Identificou-se que velocidades iguais ou inferiores a 1,0 m/min (especialmente em temperaturas elevadas) provocam a queima do polímero (burn-through), resultando em perda de propriedades mecânicas e comprometimento da estanqueidade do sistema, e;

(4) A baixa dispersão dos resultados laboratoriais indica que a metodologia de controle proposta oferece uma margem de segurança adequada para absorver variações ambientais em campo, sem comprometer a qualidade final da costura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Grupo Nortène pelo fornecimento das amostras de geomembrana e pela disponibilização do galpão e do laboratório de qualidade GAI-LAP para a execução das soldas e dos ensaios de resistência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024). NBR 16199:2020. Barreiras Geossintéticas – Instalação de Geomembranas Poliméricas

KOERNER, R. M. (2012). Designing with Geosynthetics. 6th Edition. Xlibris Corporation.

SCHEIRS, J. (2009). A Guide to Polymeric Geomembranes: A Practical Approach. Wiley.

GRI-GM19A. Standard Specification for Seam Strength and Related Properties of Thermally Bonded Homogeneous Polyolefin Geomembranes/Barriers. Geosynthetic Institute (GSI).

GRI-GM13. Standard Specification for Test Methods, Test Properties and Testing Frequency for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes. Geosynthetic Institute (GSI).

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). Geomembrane sealing systems for dams. Bulletin 135. Paris: ICOLD, 2010.