

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR UFRJ - MACAÉ
INSTITUTO POLITÉCNICO
ENGENHARIA MECÂNICA

THIAGO LUIZ BRITO CAMARGO

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MATERIAIS DE ISOLAMENTO
TÉRMICO A FRIO PARA TUBULAÇÕES EM UNIDADES DE
ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE MARÍTIMO DE GNL**

MACAÉ/RJ

2023

THIAGO LUIZ BRITO CAMARGO

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MATERIAIS DE ISOLAMENTO TÉRMICO
A FRIO PARA TUBULAÇÕES EM UNIDADES DE ARMAZENAMENTO E
TRANSPORTE MARÍTIMO DE GNL

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica do Instituto
Politécnico da Universidade Federal do
Rio de Janeiro – Centro Multidisciplinar de
Macaé – UFRJ – Macaé como parte dos
requisitos necessários à obtenção do
Grau de Engenheiro Mecânico.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Elisa Pinto da
Rocha

MACAÉ – RJ

2023

CIP - Catalogação na Publicação

C173

Camargo, Thiago Luiz Brito

Análise comparativa entre materiais de isolamento térmico a frio em unidades de armazenamento e transporte marítimo de GNL / Thiago Luiz Brito Camargo - Macaé, 2023.

61 f.

Orientador(a): Elisa Pinto da Rocha.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, Bacharel em Engenharia Mecânica, 2023.

1. Gás natural liquefeito – GNL. 2. Isolamento térmico. 3. Transferência de calor.
I. Rocha, Elisa Pinto da, orient. II. Título.

CDD 621.8

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MATERIAIS DE ISOLAMENTO TÉRMICO
A FRIO PARA TUBULAÇÕES EM UNIDADES DE ARMAZENAMENTO E
TRANSPORTE MARÍTIMO DE GNL

THIAGO LUIZ BRITO CAMARGO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DO INSTITUTO
POLITÉCNICO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO –
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE MACAÉ – UFRJ – MACAÉ COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado em 07 de junho de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Profª Drª Elisa Pinto Rocha

Prof. Drº Diego Cunha Malagueta

Eng. Mateus Barros Almeida

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, em especial aos meus pais, Maria Aparecida Brito Camargo e Luiz Antônio Camargo, pelo amor, apoio e por terem me dado as condições de ter chegado até aqui.

À minha avó Leda Brito por todo seu amor e carinho incondicional.

A todos os meus amigos e amigas que durante todos esses anos sempre estiveram comigo em todos os momentos, fossem eles bons ou ruins, e me ajudaram com seus conselhos, suas críticas, além de seus ombros e ouvidos.

À professora Dr^a. Elisa Pinto da Rocha por ter aceitado me orientar nessa árdua jornada e por conseguir suportar minhas muitas crises de ansiedade com paciência e serenidade.

Ao professor Dr Diego Cunha Malagueta pelo suporte nas épocas de desespero acadêmico e pelos conselhos durante a elaboração deste trabalho.

Agradeço também aos amigos e parceiros de trabalho da Priner Serviços Industriais S.A. que contribuíram bastante para que eu conseguisse finalizar esse desafio, seja com conhecimentos na área deste trabalho ou com palavras de incentivos.

A todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha trajetória acadêmica, o meu muito obrigado.

“Eu não fico muito impressionado com argumentos teológicos, independentemente daquilo que eles estão sendo usados para apoiar. Esses argumentos frequentemente se revelaram insatisfatórios no passado.”

(Alan Mathison Turing)

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar e comparar materiais de isolamento térmico a baixas temperaturas destinados à aplicação em tubulações e equipamentos encontrados em unidades marítimas utilizadas para transporte e armazenamento de gás natural liquefeito, operando a uma temperatura de -196°C . Para alcançar esse objetivo, foram coletadas informações de diferentes materiais isolantes disponíveis no mercado. Em seguida, esses materiais foram comparados com base em suas propriedades, tais como condutividade térmica, capacidade de proteção dos equipamentos e eficiência. Adicionalmente, realizou-se uma avaliação analítica quanto à transferência de calor, bem como cálculos para determinar a espessura ideal do isolante. Dentre os isolantes selecionados, o Cryogel apresentou maior retenção de fluxo de calor necessitando de menos material (menor espessura exigida). Além disso, a seleção do isolante apropriado depende inteiramente do projeto específico no qual ele será aplicado, devendo-se levar em consideração fatores como frequência de manutenção do equipamento, facilidade de instalação e manutenção do isolamento térmico e verba orçamentária disponível.

Palavras-chave: Isolamento Térmico, Gás Natural Liquefeito, isolantes, condutividade térmica.

ABSTRACT

The present work has the purpose of analyzing and comparing low temperature thermal insulation materials intended for application in piping and equipment found in marine units used for transportation and storage of liquefied natural gas, operating at a temperature of -196°C . To achieve this objective, information was collected on different insulating materials available on the market. These materials were then compared based on their properties, such as thermal conductivity, equipment protection capability, and efficiency. Additionally, an analytical evaluation was performed regarding heat transfer, as well as calculations to determine the ideal thickness of the insulator. Among the selected insulators, Cryogel showed greater heat flux retention, requiring less material (lower thickness required). The results of this work indicated that the selection of the appropriate insulator depends entirely on the specific project in which it will be applied and should take into consideration factors such as frequency of equipment maintenance, ease of installation and maintenance of thermal insulation, and available budget.

Keywords: Thermal Insulation, Liquefied Natural Gas, insulators, thermal conductivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cadeia de valor do GNL (Fonte: ANP - 2010).....	13
Figura 2 – Esquema da equação 16 (Fonte: Çengel et Boles - 2013).....	26
Figura 3 - Gráfico das Resistências térmicas – Espuma de Poliuretano.....	31
Figura 4 - Gráfico do Fluxo de Calor – Espuma de Poliuretano	32
Figura 5 - Gráfico do Perfil de Temperatura – Espuma de Poliuretano.....	33
Figura 6 - Gráfico das Resistências térmicas – Espuma de Vidro Celular	34
Figura 7 - Gráfico do Fluxo de Calor – Espuma de Vidro Celular.....	35
Figura 8 - Gráfico do Perfil de Temperatura – Espuma de Vidro Celular	36
Figura 9 - Gráfico das Resistências térmicas – Cryogel.....	37
Figura 10 - Gráfico do Fluxo de Calor – Cryogel.....	38
Figura 11 - Gráfico do Perfil de Temperatura – Cryogel.....	39
Figura 12 - Gráfico Comparativo entre Fluxo x Espessura 1.....	40
Figura 13 - Gráfico Comparativo entre Fluxo x Espessura 2.....	40
Figura 14 - Gráfico Comparativo entre os perfis de temperatura nos materiais	41

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Especificações técnicas do Poliuretano	15
Quadro 2 - Especificações técnicas do Vidro Celular.....	16
Quadro 3 - Parâmetros "C" e "m" em função de Re	24
Quadro 4 - Parâmetros do quase pior cenário	28
Quadro 5 - Propriedades do ar	28
Quadro 6 - Propriedades técnicas dos materiais isolantes	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	OBJETIVO GERAL.....	10
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	GÁS NATURAL	11
2.2	GÁS NATURAL LIQUEFEITO	12
2.3	ISOLAMENTO TÉRMICO A FRIO	14
2.3.1	<i>Espuma Expansiva de Poliuretano (PUF)</i>	14
2.3.2	<i>Espuma de Vidro Celular (Foam Glass)</i>	16
2.3.3	<i>Aerogel de Sílica</i>	17
2.4	DOS CONCEITOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR PARA APLICAÇÃO EM ISOLANTES TÉRMICOS	19
2.4.1	<i>Condução</i>	19
2.4.1.1	<i>Condução de calor permanente em coordenadas cilíndricas</i>	20
2.4.2	<i>Convecção</i>	20
2.4.3	<i>Radiação</i>	21
3	METODOLOGIA.....	23
3.1	CÁLCULO DO GANHO DE CALOR PARA O GNL NA AUSÊNCIA DE ISOLANTES.....	23
3.2	PERFIL TÉRMICO NOS DIFERENTES ISOLANTES.....	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1	DAS CONDIÇÕES INICIAIS DO PROJETO.....	28
4.2	DOS MATERIAIS ISOLANTES ANALISADOS.....	29
4.2.1	<i>Espuma de Poliuretano</i>	30
4.2.2	<i>Espuma de Vidro Celular</i>	33
4.2.3	<i>Cryogel (Aerogel)</i>	36
4.3	DISCUSSÃO ENTRE OS DIFERENTES TIPOS DE MATERIAIS.....	39
5	CONCLUSÃO.....	42
	REFERÊNCIAS.....	44
	APÊNDICES	46

1 INTRODUÇÃO

Em comparação a outros combustíveis fósseis, o gás natural (GN) representa uma opção energética muito mais “ambientável”. Sua queima é mais limpa, porque produz menos gases poluentes como o dióxido de carbono (CO_2), o monóxido de carbono (CO) e o enxofre. Além disso, alguns tipos de gás natural, como o Gás Natural Liquefeito (GNL), são tratados, a fim de serem ainda mais limpos.

No Brasil, historicamente, existiam poucos recursos de gás natural o que tornava o país dependente da importação do combustível da Bolívia que era transportada através de gasodutos (RIBEIRO, 2017).

A partir das descobertas do pré-sal no litoral brasileiro, o país obteve um aumento no potencial de oferta de gás natural (RIBEIRO, 2017). Contudo, o custo elevado do modal gasoduto desencoraja a utilização desse tipo de transporte.

Uma solução encontrada para a facilitação da logística é a liquefação do gás natural que a partir de -161°C a pressão atmosférica tem o seu volume reduzido em aproximadamente 600 vezes permitindo uma diminuição no custo do seu transporte.

De acordo com a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2010), a produção de GNL é justificada quando as quantidades de gás natural e/ou o trajeto entre os locais de produção e de consumo são tamanhos que torna o transporte por dutos inviável economicamente.

Para prevenir perdas com uma regaseificação prematura, entre outros problemas, é importante que tanto os tanques de armazenamentos como as tubulações das unidades que transportam e armazenam o gás natural liquefeito tenham um isolamento térmico criogênico profissional bem dimensionado e instalado eis que representa um desafio aos materiais e técnicas de isolamento empregados a manutenção constante de temperaturas tão baixas.

Além de evitar perdas térmicas ocasionadas pelo ganho de calor, é necessário evitar a condensação nas tubulações e equipamentos de uma unidade de armazenamento de GNL pois a presença de estados de não-equilíbrio nas fases durante o transporte de líquidos criogênicos pode levar à ocorrência de pulsações de pressão e desestabilização do fluxo, o que eventualmente pode ocasionar emergências (SHAMMAZOV & KARYAKINA, 2023).

Ante o exposto, o presente trabalho tem como objetivo a seleção e estudo dos principais materiais isolantes encontrados no mercado atualmente e realizar um

estudo comparativo para verificar qual material trará um melhor benefício na instalação evitando a ocorrência de condensação nas tubulações e minimizando o ganho de energia para evitar a evaporação do fluido.

Para isso, serão analisados cada material isolante a fim de determinar suas espessuras ideais para sua aplicação em conformidade com os requisitos necessários ao projeto de isolamento de uma tubulação por onde passa o GNL.

1.1 OBJETIVO GERAL

Comparar os materiais isolantes selecionados a fim de determinar o melhor isolamento térmico a ser instalado em tubulações e equipamentos em unidades marítimas de transporte e armazenamento de gás natural liquefeito.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar o fluxo de calor ganho na tubulação sem isolamento térmico aplicado;
- Verificar a temperatura de ponto de orvalho nas condições especificadas do projeto a fim de selecionar a temperatura da superfície externa do isolamento;
- Encontrar a espessura mínima dos materiais isolantes que atendam às condições do projeto;
- Analisar o perfil de temperatura nos isolantes térmicos em estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados alguns conceitos relevantes para a execução do trabalho como definições acerca do Gás Natural (GN), do Gás Natural Liquefeito (GNL) e ainda algumas definições concernentes à Transferência de Calor e de alguns dos materiais isolantes que serão estudados.

2.1 GÁS NATURAL

O gás natural é uma fonte de energia que tem um baixo impacto ambiental quando comparado com outros combustíveis fósseis e geralmente é obtido junto com o petróleo. Normalmente, durante a exploração dos poços de petróleo são encontrados bolsões de gasosos acima do óleo bruto (PEREIRA, 2007). Esses bolsões gasosos são formados pelos componentes que formam o gás natural. Dessa forma fica evidenciada a origem comum do petróleo e gás natural, eis que ambos são encontrados e extraídos juntos.

Ambos têm sua origem na decomposição de materiais orgânicos de origens animal e vegetal submetidos a altas temperaturas e pressões que durou milhões de anos para acontecer. Quanto à sua composição, enquanto o petróleo é composto de hidrocarbonetos com até 87% de Carbono, a parte gasosa é composta majoritariamente por Metano (CH_4) que é o menor alcano que existe. Entre os outros componentes do gás natural estão os hidrocarbonetos com até 4 átomos de Carbono que são: o Etano (C_2H_6), o Propano (C_3H_8) e o Butano (C_4H_{10}). Podem ser encontrados, ainda, traços de outros gases a exemplo do CO_2 , H_2S e N_2 (PEREIRA, 2007).

O principal uso do gás natural, atualmente é o de combustível para veículos automotores, substituindo a gasolina, o diesel e o etanol, ou para a geração de energia elétrica em usinas termelétricas (RIBEIRO, 2017), substituindo outros combustíveis fósseis mais poluentes como é o caso do carvão mineral.

Entre as principais vantagens na utilização do gás natural está na sua facilidade de transporte que, em geral, é realizado através de redes de tubos de aço que interligam as fontes produtoras do gás aos seus centros consumidores. A essas redes dá-se o nome de gasodutos.

2.2 GÁS NATURAL LIQUEFEITO

O Gás Natural Liquefeito (GNL) nada mais é que o gás natural, que ocorre como subproduto do refinamento do petróleo, resfriado a temperaturas abaixo de -160°C, o que diminui seu volume em até 600 vezes facilitando seu transporte e armazenamento.

O processo de liquefação do gás natural, além das vantagens supramencionadas, possibilita ainda a purificação de toda a sua composição tornando-o ainda mais estável e a partir daí apresenta um nível de pureza mais elevado.

SILVA (2013) caracteriza o Gás Natural Liquefeito (GNL) como um fluido criogênico, eis que o seu ponto de ebulição, a pressão atmosférica, encontra-se abaixo de -73°C.

No Brasil, a utilização do GNL tem sido cada vez mais difundida, principalmente nas indústrias. Além de ser uma fonte energética limpa e renovável, o GNL também é mais seguro e menos poluente que os outros combustíveis fósseis.

O gás natural liquefeito é um produto que pode ser transportado e armazenado em grandes quantidades, o que o torna uma solução viável para o transporte do gás natural em grandes distâncias.

O GNL pode ser utilizado diretamente como combustível na indústria, ou pode ser queimado em unidades de geração de energia elétrica ou térmica, onde é gerado energia elétrica a partir da queima do combustível. A geração de energia térmica a partir do GNL pode ser aplicada para aquecimento de ambientes e processos industriais. Pode ser ainda utilizado para a geração de energia elétrica através de usinas termoelétricas, que utilizam a energia térmica gerada pela queima do GNL para aquecer a água que gira uma turbina que está ligada a um gerador.

Segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2010) as etapas que constituem a cadeia de valor do GNL são: a) exploração, produção e processamento do gás natural; b) liquefação; c) transporte; d) armazenamento; e) regaseificação; f) distribuição ao mercador consumidor. Essa sequência de etapas é ilustrada na Figura 1.



Figura 1 - Cadeia de valor do GNL (Fonte: ANP - 2010)

Ainda segundo a ANP (2010), a etapa de liquefação ocorre através de diversos processos que visam converter o gás natural de seu estado gasoso para o estado líquido. Essa etapa ocorre em uma planta de liquefação que é composta por uma ou mais unidades de processamento modular e podem conter instalações para armazenamento do produto para seu posterior transporte e/ou regaseificação. De acordo com a agência reguladora, o que influencia o desenho de cada planta são fatores como: a composição do gás, quantidade do gás a ser produzido e liquefeito e a localização da produção. Contudo, apesar de cada planta ser única, todas realizam os mesmos procedimentos para tratamento e purificação do gás natural e posterior liquefação do produto por meio do processo de resfriamento.

Após o processo de liquefação, o gás natural liquefeito (GNL) é armazenado em depósitos de tanques de grande capacidade, os quais são mantidos sob baixas temperaturas e pressões para garantir a permanência do produto em seu estado líquido.

O transporte do GNL até as unidades de regaseificação pode ocorrer através de meios marítimos e/ou rodoviários. Para o transporte do produto através de grandes distâncias são utilizadas as vias marítimas com navios especialmente equipados para esse tipo de transporte chamado navios metaneiros, para distâncias

mais curtas é mais comum a utilização dos meios rodoviários através dos caminhões-tanque, que também são equipados para essa finalidade.

O GNL é regaseificado por meio de processos de estufagem, ou seja, quando é aquecido a temperaturas elevadas, tornando-se novamente um gás. O gás regaseificado é então conduzido para a rede de distribuição, que leva o produto até os consumidores finais.

2.3 ISOLAMENTO TÉRMICO A FRIO

A aplicação do isolamento térmico a frio tem por finalidade garantir a integridade dos equipamentos e otimizar o desempenho do serviço, evitando a condensação e conseqüentemente a corrosão das tubulações que transportam o fluido em baixas temperaturas.

O isolamento térmico a frio é realizado de acordo com a temperatura do fluido a ser transportado, e é aplicado com a espessura adequada para manter a temperatura do produto constante, proporcionando maior vida útil para o equipamento.

Como elenca SILVA (2021), vale destacar algumas das características de bons materiais isolantes quais sejam:

- a) baixa condutividade térmica;
- b) boa resistência mecânica;
- c) não sofrer influência sobre temperatura na qual é aplicada;
- d) não ser combustível;
- e) ser imputrescível;
- f) ter baixo custo;
- g) baixa permeabilidade sob vapor de água.

Dentre os materiais disponíveis no mercado para a instalação desse tipo de isolamento térmico podemos citar a Espuma Expansiva de Poliuretano (PUF), Espuma de Vidro Celular (Foam Glass) e Aerogel de Sílica (em mantas).

2.3.1 Espuma Expansiva de Poliuretano (PUF)

A Espuma Expansiva de Poliuretano (*PUF*) trata-se de uma espuma rígida utilizada como material isolante bicomponente obtido através da reação química de

um isocianato (componente A) e um polioli (componente B). O gás liberado como subproduto da reação química entre os dois componentes é o responsável pela expansão da espuma, que se espalha por toda a área a ser isolada, atingindo um alto fator de isolamento em consequência de um baixo coeficiente de condutividade térmica e uma baixa massa aparente.

Os poliols utilizados na formulação da espuma de poliuretano são poliols alifáticos ou aromáticos. Os poliols alifáticos são os mais utilizados, pois apresentam menor reatividade com o ar do que os aromáticos. De acordo com Marciano (2016) é o polioli que define na maior parte as propriedades finais por conter o agente de expansão, catalisador, estabilizadores de espuma e outros aditivos.

Já os isocianatos são compostos orgânicos que apresentam como função principal a formação de insaturações, que podem ser utilizadas na reação com poliols. Os isocianatos mais utilizados na formulação da espuma de poliuretano são: MDI (Poli-difenil-metano isocianato) e TDI (Poli-tolueno-di-isocianato).

A PUF é considerada um material de isolamento térmico de alto desempenho, fácil aplicação e grande versatilidade, podendo ser utilizada em superfícies horizontais, verticais e planas. Além disso, sua reação química é rápida, permitindo uma aplicação rápida, garantindo uma boa eficiência de isolamento térmico.

No Quadro 1 são apresentadas algumas especificações técnicas do poliuretano relacionadas por SILVA (2013).

Quadro 1 - Especificações técnicas do Poliuretano

Densidade	40 kg/m ³
Condutividade térmica	0,023 W/m.°C
Reação ao fogo	M1 à M3
Fator de resistência à difusão de vapor de água	-
Energia incorporada	1200 kWh/m ³
Emissões de CO₂	(valor muito elevado)

Fonte: (SILVA, 2013)

Consoante Motta (2011) é importante observar os efeitos da temperatura e tempo ao utilizar a espuma de poliuretano em isolamentos térmicos dado que suas propriedades mecânicas diminuem conforme a temperatura aumenta e quando aplicada pressão por um tempo estendido à espuma (*Creep test*), será notado que a

força suportada será apenas uma fração daquela apresentada num teste de força de compressão.

A espuma de poliuretano é um produto que não oferece riscos à saúde do ser humano, mas é importante ficar atento aos cuidados na aplicação por ser altamente inflamável, visto que a fumaça liberada nessa ocasião pode causar irritação ocular, dor de garganta e comprometer a respiração.

2.3.2 Espuma de Vidro Celular (*Foam Glass*)

A Espuma de Vidro Celular (*Foam Glass*) é um material de isolamento térmico rígido de baixa densidade e alta resistência, composto de milhões de células de vidro completamente vedadas, cada uma delas formando um espaço de isolamento.

A *Foam Glass* é produzida através do processamento do vidro em uma forma de espuma. Ela é feita com vidros reciclados ou vidros de resíduos de produção, que são triturados e aquecidos até o estado líquido. Em seguida, o líquido é injetado em um molde e aquecido até solidificar. A produção da Espuma de Vidro Celular (*Foam Glass*) é um processo relativamente limpo, uma vez que não utiliza aditivos químicos. Além disso, a espuma de vidro celular é um material completamente reciclável.

Espuma de Vidro Celular é amplamente utilizado em aplicações de isolamento térmico para grandes equipamentos industriais e linhas de produção, como máquinas de processamento, equipamentos de aquecimento, equipamentos elétricos e tubulações.

No Quadro 2, Silva (2013) relaciona algumas especificações técnicas do vidro celular que compõe a *Foam Glass*.

Quadro 2 - Especificações técnicas do Vidro Celular

Densidade	100 a 165 kg/m ³
Condutividade térmica	0,035 a 0,048 W/m.°C
Reação ao fogo	M0
Fator de resistência à difusão de vapor de água	-
Energia incorporada	1600 kWh/m ³
Emissões de CO₂	45 kg de CO ₂ eq/m ³

Fonte: (SILVA, 2013)

Dentre as principais vantagens da utilização da espuma de vidro celular podemos citar:

- a) sua eficiência a altas e baixas temperaturas (-268°C a 450°C);
- b) resistente à água em forma líquida e vapor;
- c) não corrosivo;
- d) não combustível e não absorvente de líquidos combustíveis;
- e) resistente à maioria dos reagentes industriais;
- f) estabilidade dimensional sob uma variedade de condições de temperatura e umidade; entre outras.

A umidade pode entrar diretamente no isolamento por absorção de água, mas nos casos das aplicações a frio, uma fonte ainda mais significativa de penetração da umidade é a difusão do vapor de água que pode condensar como líquido ou gelo. Na medida que aumenta o gradiente de temperatura entre a superfície exterior do isolamento e a superfície do próprio equipamento isolado, aumenta também o coeficiente potencial de do vapor de água.

Em sua maioria, os isolamentos de sistemas com baixas temperatura são espumas orgânicas de células fechadas e estão sujeitos à permeabilidade do vapor de água. Com estas espumas orgânicas, a umidade pode penetrar e ser transmitida através do isolamento devido ao gradiente de pressão de vapor de água supramencionado. Quando o serviço é de baixa temperatura, esses isolamentos úmidos não têm oportunidade de secar e, por isso, a umidade se acumula até uma saturação permanente de líquido ou acumulação de gelo.

No entanto, a permeabilidade ao vapor de água do isolamento com *Foam Glass* é pelo menos 100 a 10.000 vezes menor que a dos demais materiais de isolamento. Como resultado, a intrusão do vapor de água nos sistemas de baixa temperatura é virtualmente eliminada e a eficiência térmica é mantida.

2.3.3 Aerogel de Sílica

Os aerogéis existem há mais de 70 anos. São constituídos de sólidos de sílica leves resultantes de um gel em que o elemento líquido foi substituído por gás. Os sólidos de sílica, que são maus condutores, consistem em minúsculos agrupamentos tridimensionais entrelaçados que compreendem apenas 3% do

volume. A condução através do sólido é, portanto, muito baixa. Os 97% restantes do volume são compostos por ar em nanoporos extremamente pequenos. O ar tem pouco espaço para se mover, inibindo tanto a convecção como a condução em fase gasosa.

A principal vantagem do aerogel é a sua baixa densidade. Enquanto uma porção de areia tem uma densidade de aproximadamente 1500 kg/m^3 , a densidade de um aerogel de sílica é de cerca de 90 kg/m^3 . Isto significa que um metro cúbico de areia pesa aproximadamente 15 vezes mais do que um metro cúbico de aerogel de sílica. Além de leves os aerogéis são extremamente flexíveis podendo ser comprimidos até 1/50 de seu volume original sem sofrer danos e podem suportar pressões de até 10 toneladas por metro quadrado.

O calor específico do aerogel de sílica é mais de 300 vezes menor do que o calor específico da água, o que significa que o aerogel pode armazenar muito menos calor do que a água.

Lima (2018) menciona que devido a composição por nanopartículas de sílica, óxido de silício, o material forma uma estrutura sólida de densidade extremamente baixa, porém apresentando propriedades isolantes elevadas. A manta flexível constituída por aerogel possui elevado desempenho térmico, além de apresentar baixa espessura necessária a aplicação e alta flexibilidade para ser instalada; costuma apresentar características favoráveis à ambientes sujeitos a alta umidade.

Para Silva (2011), devido à porosidade e tamanho dos nanoporos, o aerogel de sílica é um material que apresenta uma condutividade térmica muito baixa, ainda menor do que o ar imóvel. Foi demonstrado que a condutividade térmica de um aerogel é da ordem de 0.02 W/(m.K) à temperatura ambiente e pressão do ar constante.

Dentre as principais vantagens da utilização de mantas de aerogel de sílica podemos citar:

- a) eficiência em temperaturas extremas – *Cryogel* entre -270°C e 90°C e *Pyrogel* entre -40°C e 650°C ;
- b) baixa espessura comparada aos isolantes convencionais;
- c) quimicamente inerte, incombustível, não propaga chama, não gera fumaça;
- d) extremamente hidrofóbico (água e vapor de água);
- e) permite ganhos de logística e produtividade.

2.4 DOS CONCEITOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR PARA APLICAÇÃO EM ISOLANTES TÉRMICOS

A transferência de calor é a transferência de energia térmica de um corpo para outro. A energia térmica pode ser transferida de três maneiras diferentes: condução, convecção e radiação. A condução é o tipo de transferência de calor mais comum e ocorre quando dois corpos são colocados em contato. A convecção é a transferência de calor que ocorre quando um fluido, como o ar ou a água, se move sobre uma superfície. A radiação é a transferência de calor que ocorre através do espaço sem que haja qualquer contacto entre os corpos.

Cada um dos três tipos de transferência de calor tem suas próprias características. A condução é geralmente lenta e ocorre apenas quando os dois corpos estão em contacto. A convecção pode ser mais rápida, pois o fluido se move sobre a superfície, permitindo que a energia térmica seja transferida mais rapidamente. A radiação é a forma de transferência de calor mais rápida, pois a energia térmica pode ser transferida através do espaço sem que haja qualquer contacto entre os corpos.

2.4.1 Condução

Transmissão de calor por condução é o processo de transferência de energia entre duas superfícies (ou seja, entre duas partículas) que estão em contato umas com as outras. A taxa de transferência de calor entre duas superfícies é diretamente proporcional à área de contato entre as superfícies e à diferença de temperatura entre elas. Ou seja, quanto maior a área de contato e quanto maior a diferença de temperatura, maior a taxa de transferência de calor.

A condução de calor é um processo físico que envolve a transferência de energia térmica através de um material, sem que haja movimento de matéria. A condução de calor ocorre quando há um gradiente de temperatura através do qual a energia térmica se move. A taxa de condução de calor é determinada pela diferença de temperatura através do material e pelo coeficiente de condução térmica do material.

A partir das definições supra, percebe-se que a transferência de calor por condução ocorre através de alterações de temperaturas em meios estacionários sólidos ou fluidos.

De acordo com a Lei Zero da Termodinâmica, sabe-se que essa transmissão de calor acontece entre partículas com maior valor energético para partículas com menor valor de energia, por meio de iterações entre elas (SILVA, 2021).

Ainda segundo Silva (2021) a lei de Fourier foi desenvolvida através de observações dos fenômenos, de acordo com a Equação 1:

$$q_x = KA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Onde:

q_x – Taxa de transmissão de calor (w);

K – Constante de condutividade térmica (W/(K.m));

A – Área da seção (m²);

ΔT – Diferença de temperatura (K);

Δx – Distância (m).

2.4.1.1 Condução de calor permanente em coordenadas cilíndricas

Incropera et DeWitt (2014) definem que a taxa de condução de energia através de qualquer superfície cilíndrica no sólido pode ser representada pela Equação 2:

$$q_r = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \quad (2)$$

na qual $A = 2\pi rL$ é a área normal à direção da transferência de calor.

Para o cálculo da resistência térmica em um sistema cilíndrico, Incropera et DeWitt (2014) apresentam a expressão da Equação 3:

$$R_{t,cond} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \quad (3)$$

2.4.2 Convecção

A convecção é um processo físico no qual a energia térmica é transferida de um corpo para outro através do movimento de um fluido. A energia térmica é transferida para o fluido através do contato direto com o corpo e, em seguida, é transferida para outro corpo através do movimento do fluido. A taxa de convecção de

calor é determinada pelas propriedades do fluido e pelas diferenças de temperatura entre os corpos.

A convecção pode ser classificada em dois tipos, a convecção forçada e a convecção natural. A convecção forçada ocorre quando o fluido é movido por um dispositivo externo, como um ventilador, bomba ou compressão. A convecção natural ocorre quando o fluido é movido pelas diferenças de densidade causadas pelas diferenças de temperatura.

Para Incropera et DeWitt (2014), independentemente da natureza do processo de transferência de calor por convecção, a equação apropriada para a taxa de transferência é aquela dada pela Lei de Resfriamento de Newton dada pela Equação 4:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (4)$$

onde tem-se,

q'' – fluxo de calor por convecção (W/m²);

h – coeficiente de transferência de calor por convecção (W/(m².K));

T_s – Temperatura da superfície (K);

T_∞ - Temperatura do fluido (K).

2.4.3 Radiação

A radiação é um processo físico no qual a energia térmica é transferida de um corpo para outro através da radiação eletromagnética. A energia térmica é transferida para o ar ou para o espaço através da radiação, e em seguida é transferida para o outro corpo através da radiação. A taxa de radiação de calor é determinada pelas propriedades do corpo e pelas diferenças de temperatura entre os corpos.

A Lei de Stefan-Boltzmann, segundo Incropera et DeWitt (2014), dá o fluxo térmico emitido por uma superfície ideal, conhecido como “corpo negro” a partir da Equação 5:

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (5)$$

em que:

E_b – Poder emissivo do corpo negro (W/m²);

σ – Constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,670 \times 10^{-8}$ (W/(m².K⁴));

T – Temperatura absoluta do corpo emissor (K).

Ainda de acordo com Incropera et DeWitt (2014), uma superfície real emite um fluxo térmico menor do que aquele emitido por um corpo negro à mesma temperatura. Esse fluxo pode ser dado pela Equação 6:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (6)$$

onde ε é uma propriedade radiante da superfície chamada emissividade. Com valores na faixa de 0 a 1, ε é uma propriedade que fornece uma medida da eficiência na qual um corpo emite energia em relação a um corpo negro.

3 METODOLOGIA

Visando identificar o material de isolamento térmico que melhor garantirá a conservação de energia em equipamentos e tubulações em uma unidade de armazenamento e transporte de gás natural liquefeito, este trabalho busca analisar teoricamente três materiais isolantes que são mais utilizados pela indústria atualmente.

3.1 CÁLCULO DO GANHO DE CALOR DO MEIO AMBIENTE PARA O GNL NA AUSÊNCIA DE ISOLANTES

Segundo Young (2020), os motivos mais comuns a serem considerados no dimensionamento do isolamento térmico para unidades de GNL são: a) minimizar a condensação na superfície externa do sistema isolado e; b) limitar o ganho de calor no GNL para reduzir a incidência do *boill-off gas*.

A primeira etapa consiste em calcular o coeficiente de convecção forçada do ar externo à tubulação que será utilizado como parâmetro nos demais cálculos. Para isso, faz-se necessário a análise do número adimensional de Reynolds através da Equação 7.

$$Re = \frac{vL_c}{\nu} \quad (7)$$

Onde:

v – velocidade do vento (m/s);

L_c – dimensão característica (m);

ν – viscosidade cinemática (m²/s)

Após encontrar o número de Reynolds, passa-se para a etapa de cálculo do coeficiente de convecção através da Equação 8.

$$h_c = C \frac{k}{L_c} Re^m Pr^{0,37} \quad (8)$$

Onde:

k – condutividade do ar (W/(mK));

L_c – dimensão característica (m);

Re – número adimensional de Reynolds;

Pr – número adimensional de Prandtl.

Re e Pr serão calculados levando-se em consideração a temperatura ambiente e os parâmetros C e m da Equação 8 são obtidos no Quadro 3 em função do número de Reynolds.

Quadro 3 - Parâmetros "C" e "m" em função de Re

Re	C	m
40 a 1 000	0,51	0,5
1.000 a 2×10^5	0,26	0,6
2×10^5 a 10^6	0,076	0,7

Fonte: (INCROPERA et DEWITT, 2014)

Finalmente, conhecendo o coeficiente de convecção é possível determinar o fluxo de calor na tubulação sem nenhum isolamento térmico instalado utilizando a Equação 4.

Esses cálculos devem ser repetidos para cada incremento de material isolante tendo em vista que varia de acordo com o comprimento característico da tubulação, considerado aqui o diâmetro externo do tubo (INCROPERA et DEWITT, 2014).

3.2 PERFIL TÉRMICO NOS DIFERENTES ISOLANTES

A segunda etapa para o dimensionamento adequado do isolamento será determinar a temperatura de ponto de orvalho do ambiente no qual a tubulação se encontra, pois abaixo dessa temperatura ocorrerá a condensação, efeito que precisa ser mitigado e/ou evitado.

Çengel et Boles (2013) definem a temperatura de ponto de orvalho como “temperatura pela qual a condensação começa quando o ar é resfriado a pressão constante”. Para encontrar a temperatura de ponto de orvalho (T_{po}) faz-se necessário descobrir a pressão constante (P_v) a partir da qual a umidade do ar começa a condensar.

É possível encontrar P_v utilizando a Equação 9:

$$P_v = \phi P_{ar@32,2^\circ C} \quad (9)$$

Onde,

Φ – umidade relativa do ar (%);

$P_{ar@32,2^{\circ}C}$ – pressão de saturação do ar a 32,2°C (kPa).

Após determinar P_v é possível encontrar a temperatura de ponto de orvalho, conforme Equação 10 citada em Çengel et Boles (2013):

$$T_{po} = T_{sat@Pv} \quad (10)$$

Sendo $T_{sat@Pv}$ a temperatura de saturação do ar à pressão constante em °C.

Pode-se encontrar a temperatura buscada na Equação 10 com auxílio da tabela termodinâmica para água, líquido-vapor saturados (ÇENGEL et BOLES, 2013).

Conhecendo a temperatura de ponto de orvalho é possível fixar mais um parâmetro no cálculo do isolamento, pois abaixo dessa temperatura ocorrerá condensação, efeito que se busca evitar. Portanto, a temperatura do diâmetro externo do isolamento deve ser igual ou maior à temperatura do ponto de orvalho encontrada.

Numa terceira etapa é possível calcular o raio crítico de isolamento para verificar se existe uma espessura ideal para o isolamento. Esse raio crítico pode ser analisado pela Equação 11 (INCROPERA et DEWITT, 2014):

$$r_c = \frac{k}{h} \quad (11)$$

Onde k é a condutividade térmica do material isolante e h é o coeficiente de transferência de calor por convecção calculado em (8).

Com todos os parâmetros definidos é possível calcular então as espessuras dos materiais isolantes avaliados neste trabalho. Para isso, serão utilizadas as equações 12-15 a seguir (INCROPERA et DEWITT, 2014):

$$q'' = \frac{\Delta T}{R''_{total}} \quad (12)$$

$$R''_{total} = R''_{conv} + R''_{cond} \quad (13)$$

$$R''_{conv} = \frac{1}{h_c} \quad (14)$$

$$R''_{cond} = \frac{r}{k} \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) \quad (15)$$

Onde,

q'' – fluxo de calor (W/m^2);

ΔT – diferença de temperaturas (K);

R''_{total} – resistência térmica total ($(m^2K)/W$);

R''_{conv} – resistência térmica de convecção ($(m^2K)/W$);

R''_{cond} – resistência térmica de condução ($(m^2K)/W$);

h_c – coeficiente de convecção forçada ($W/(m^2K)$);

r – raio externo do isolamento (m);

k – condutividade térmica do material isolante ($W/(mK)$);

r_1 – raio interno da tubulação (m).

Por fim, para análise da distribuição de temperaturas através dos materiais isolantes observados, pode-se utilizar a Equação 16 (INCROPERA et DEWITT, 2014):

$$T(r) = T_2 + \Delta T \left(\frac{\ln(r/r_2)}{\ln(r_1/r_2)} \right) \quad (16)$$

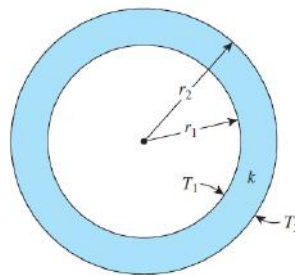


Figura 2 – Esquema da equação 16 (Fonte: Çengel et Boles - 2013)

Sendo,

$T(r)$ – temperatura no material isolante na posição r ($^{\circ}C$);

T_2 – temperatura na superfície externa do isolante ($^{\circ}C$);

ΔT – diferença de temperaturas ($T_2 - T_1$) ($^{\circ}C$);

r – posição no material em que se calcula a temperatura $T(r)$ (m);

r_2 – raio externo da tubulação adicionado à espessura do isolante térmico (m);

r_1 – raio interno do isolamento térmico (m).

Após todas essas etapas concluídas para cada um dos materiais e a partir dos resultados obtidos passa-se à análise comparativa dos isolantes em estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados encontrados.

4.1 DAS CONDIÇÕES INICIAIS DO PROJETO.

Para Young (2020), os cálculos de projeto para dimensionamento de isolamento térmico em tubulações de unidades marítimas que armazenam e transportam o GNL, devem levar em conta um cenário “próximo ao pior caso” das condições climáticas a serem aplicadas. O Quadro 4 relaciona os dados para esse cenário.

Quadro 4 - Parâmetros do quase pior cenário

Temperatura do ambiente	32,2°C (90°F)
Umidade Relativa	85%
Velocidade do vento	3,13 m/s (7 mph)
Ganho de calor (q’')	≤ 25 W/m ²

Fonte: (Young, 2020)

Além dos parâmetros apresentados no Quadro 4, para os cálculos apresentados no presente trabalho considerou-se que o sistema se encontra em regime estacionário e que, dado a fina espessura da parede da tubulação, a temperatura do diâmetro externo do duto é igual à temperatura de operação do fluido, -196°C.

Com base nas condições do Quadro 4, é possível definir as propriedades do ar necessários para o cálculo do número adimensional de Reynolds de acordo com a Equação 7 e posterior cálculo do coeficiente de convecção.

Quadro 5 - Propriedades do ar

Viscosidade Cinemática (m²/s)	16,42x10 ⁻⁶
Condutividade Térmica (W/m.°C)	0,0266959
Número de Prandtl (Pr)	0,70656

Fonte: (INCROPERA et DEWITT, 2014)

A partir dos dados apresentados e considerando que o comprimento característico (L_c) para uma superfície cilíndrica é igual seu diâmetro externo (INCROPERA et DEWITT, 2014). Para $L_c = 219,08\text{mm}$ obtém-se um Reynolds de:

$$Re = 41.760,338$$

Com isso, utiliza-se a Equação 8 para cálculo do coeficiente de convecção, observando-se os parâmetros “C” e “m” do Quadro 3 para o Reynolds encontrado acima. Temos então:

$$h_c = 16,50 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Após encontrarmos o coeficiente, é possível, através da Equação 4, conhecer o fluxo de calor que acontece na tubulação sem nenhum material isolante aplicado.

$$q'' = 3.765,17 \text{ W/m}^2$$

A partir das Equações 9 e 10, é possível encontrarmos a temperatura de ponto de orvalho para $P_{ar@32,2^\circ\text{C}} = 4,8551 \text{ KPa}$.

$$P_v = 0,85 \times 4,8551$$

$$P_v = 4,1268 \text{ KPa}$$

$$T_{Po} = 29,44^\circ\text{C}$$

Conhecendo a temperatura que precisa ser evitada para evitar a ocorrência de condensação, definiu-se que a temperatura da superfície externa do isolamento em $T = 32^\circ\text{C}$.

4.2 DOS MATERIAIS ISOLANTES ANALISADOS.

Uma vez conhecidas as condições iniciais do projeto, pode-se passar para a apresentação dos resultados e análises para cada um dos materiais isolantes considerados.

Todos os dados foram obtidos utilizando-se as equações apresentadas no Capítulo 3 para cálculo das resistências térmicas e fluxo de calor. Para esta análise faz-se necessário recalcular o número de Reynolds e do coeficiente convectivo a cada incremento de espessura do material tendo em vista que esses parâmetros são dependentes do diâmetro externo que é alterado a cada vez que a espessura aumenta ou diminui.

A fim de facilitar os processos de leitura e entendimento, os dados necessários para as análises a seguir serão apresentados nos Apêndices deste trabalho.

4.2.1 Espuma Expansiva de Poliuretano

As características que levaram a escolha da análise da Espuma de Poliuretano como material isolante para esse projeto são a baixa condutividade térmica, estabilidade dimensional, baixas permeabilidade e absorção de água, baixo peso e seu intervalo de temperatura de serviço que alcança extremos -200°C (BAHADORI, 2014).

Em primeiro lugar, será calculado o raio crítico para verificar se existe uma espessura ideal do material isolante a ser considerada.

É conhecido que a condutividade térmica (k) do PU é de $0,023 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$. Dessa forma teremos um raio crítico

$$r_c = 1,39\text{mm}$$

O raio crítico encontrado é muito menor que o raio da tubulação. Dessa forma conclui-se que “qualquer adição de isolante aumenta a resistência total e, portanto, diminui a perda de calor” (INCROPERA et DEWITT, 2014).

Para encontrar a espessura ideal da Espuma de Poliuretano a ser aplicada, foram calculados, com auxílio do software Microsoft Excel, os valores de Re , h_c e fluxo de calor para cada incremento de espessura até encontrar aquela que atende os critérios definidos anteriormente, como podem ser observados nos Apêndices a esse trabalho.

A espessura ideal para atendimento ao critério de $q'' \leq 25 \text{ W/m}^2$ é de 142mm do material. Contudo ao utilizarmos as Equações 12 e 15 para verificarmos que o

fluxo de condução não atende ao critério da temperatura de superfície externa igual a 32°C conforme se observa

$$R''_{cond}(142mm) = 9,09 \text{ (m}^2\text{°C)/W}$$

$$q''_{cond}(32^\circ\text{C}) = 25,08 \text{ W/m}^2$$

Passamos então para a espessura imediatamente seguinte (143mm) e obtemos então a espessura que atende ao projeto para o material isolante em estudo eis que nessa configuração $q'' \leq 25 \text{ W/m}^2$

$$R''_{cond}(143mm) = 9,17 \text{ (m}^2\text{°C)/W}$$

$$q''_{cond}(32^\circ\text{C}) = 24,86 \text{ W/m}^2$$

Na Figura 3, o gráfico mostra a relação das resistências térmicas totais, de condução e de convecção. É possível perceber que conforme adicionamos material isolante à tubulação a resistência térmica de condução passa a ter a maior contribuição para diminuir ganho de calor indesejado.

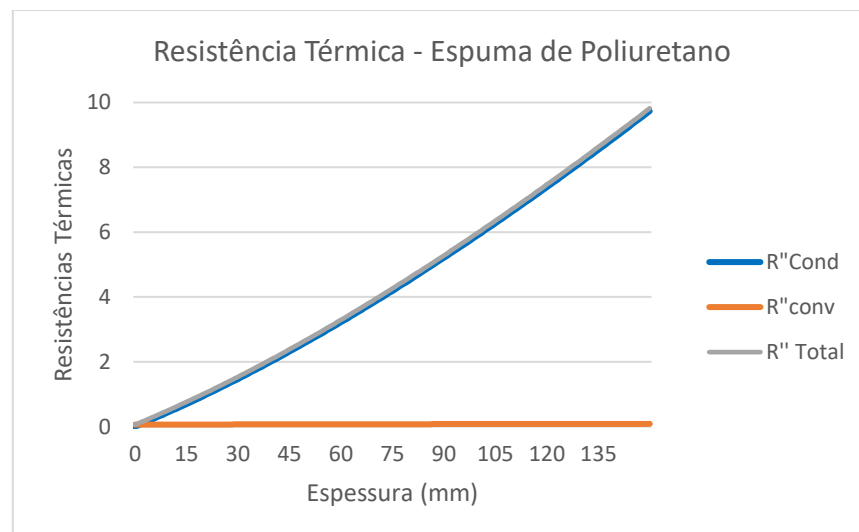


Figura 3 - Gráfico das Resistências térmicas – Espuma de Poliuretano

O gráfico da Figura 4 mostra a variação do ganho de fluxo de calor conforme a espessura do material aumenta, resultado que já era esperado desde a análise do raio crítico realizada.

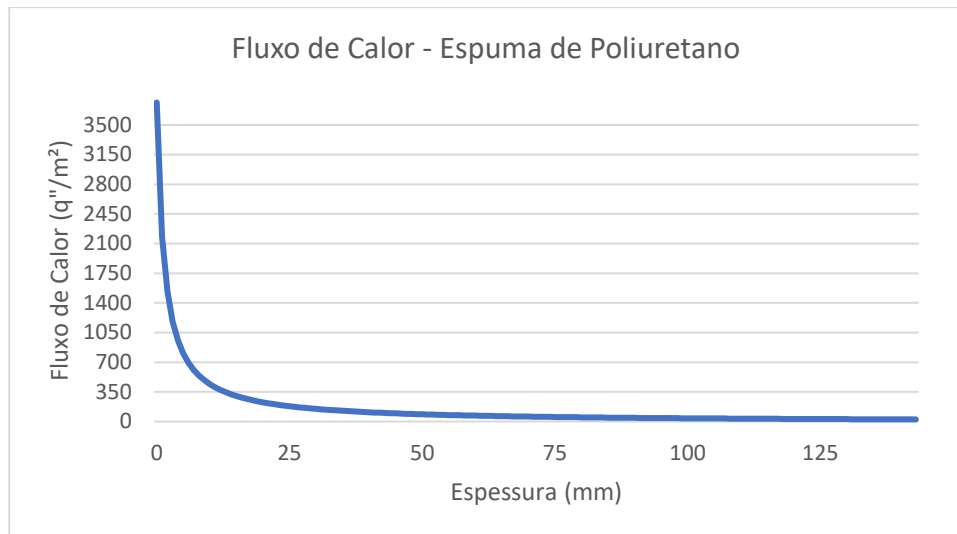


Figura 4 - Gráfico do Fluxo de Calor – Espuma de Poliuretano

É possível observar pelo resultado demonstrado no gráfico da Figura 4 que a partir da adição de 25mm de isolante, o ganho de fluxo de calor para o GNL passa a ser desprezível e estável, não havendo necessidade de adicionar uma espessura de isolante muito maior que este valor.

A partir da Equação 16, o perfil de temperatura no isolante pode ser demonstrado frente à variação de sua espessura conforme pode ser visualizado no gráfico apresentado na Figura 5.

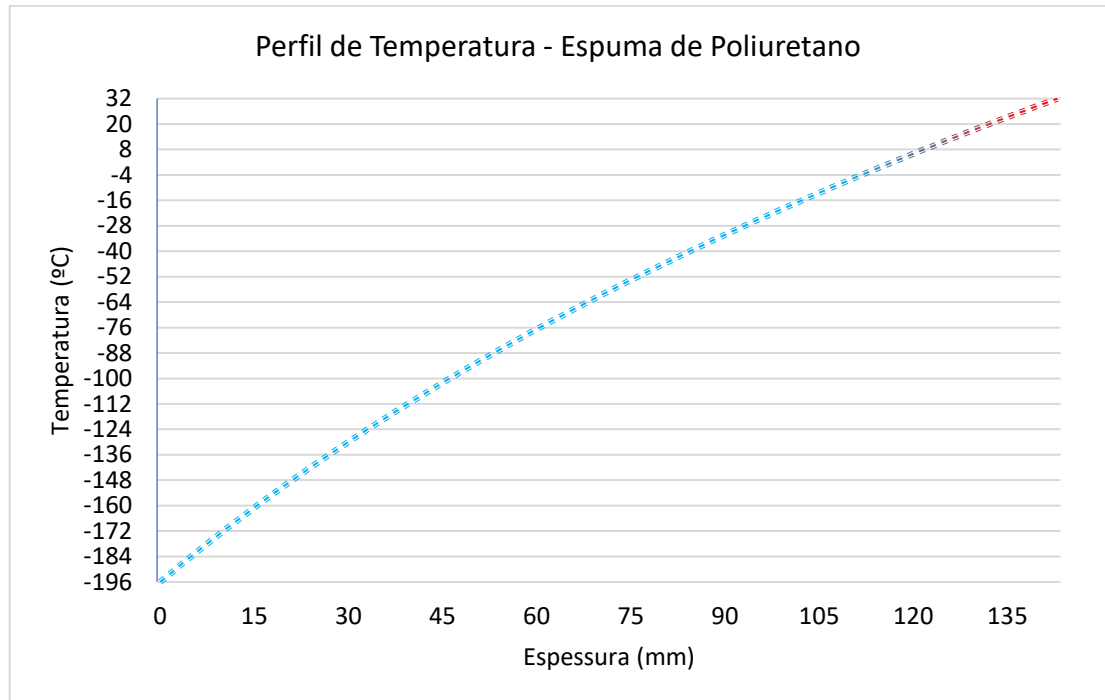


Figura 5 - Gráfico do Perfil de Temperatura – Espuma de Poliuretano

Observa-se o perfil logarítmico da curva na qual quando atingida a espessura de aproximadamente 135mm a temperatura externa do isolante atinge a temperatura do ambiente, não havendo mais ganho de calor para o GNL. Além disso, é importante que a espessura atinja valores de temperatura acima de 29°C para assegurar o fluxo máximo de ganho de acordo com o definido nas condições de projeto por Young (2020) e também para evitar a condensação de água do ar ambiente na tubulação, já que esta condensação colaboraria com a passagem de calor para o interior do tubo, visto o aumento de contato entre fluido externo e parede externa da tubulação.

4.2.2 Espuma de Vidro Celular

Dentre as principais características desse material pode-se mencionar sua baixa condutividade térmica, estabilidade dimensional, resistência à compressão, resistência à água em suas formas líquidas e vapor, não corrosividade e sua temperatura de serviço pode alcançar -268°C (BAHADORI, 2014).

Para a análise da Espuma de Vidro Celular que apresenta uma condutividade térmica (k) de 0,033 W/m°C tem-se um raio crítico de

$$r_c = 2,00mm$$

Foram realizadas as mesmas iterações descritas na seção 4.2.1 para este material e pode-se observar que para garantir o fluxo de calor na faixa desejada a espessura ideal do isolante em estudo a ser aplicada seria de 189mm. Contudo para atender a temperatura de superfície de 32°C a espessura encontrada não atende como pode-se observar

$$q''_{cond}(32^{\circ}C) = 25,14 W/m^2$$

Por isso passa-se a análise para a espessura de 190mm e verifica-se que

$$q''_{cond}(32^{\circ}C) = 24,97 W/m^2$$

Dessa forma é possível concluir que para atender as necessidades do projeto com a instalação do *Foam Glass* precisa-se de uma espessura mínima de 190mm.

O gráfico apresentado na Figura 6 mostra a relação entre as resistências térmicas e, como já esperado após a análise do raio crítico, é possível perceber que conforme aumenta a espessura do material, a resistência térmica total aumenta significativamente com o aumento da resistência de condução.

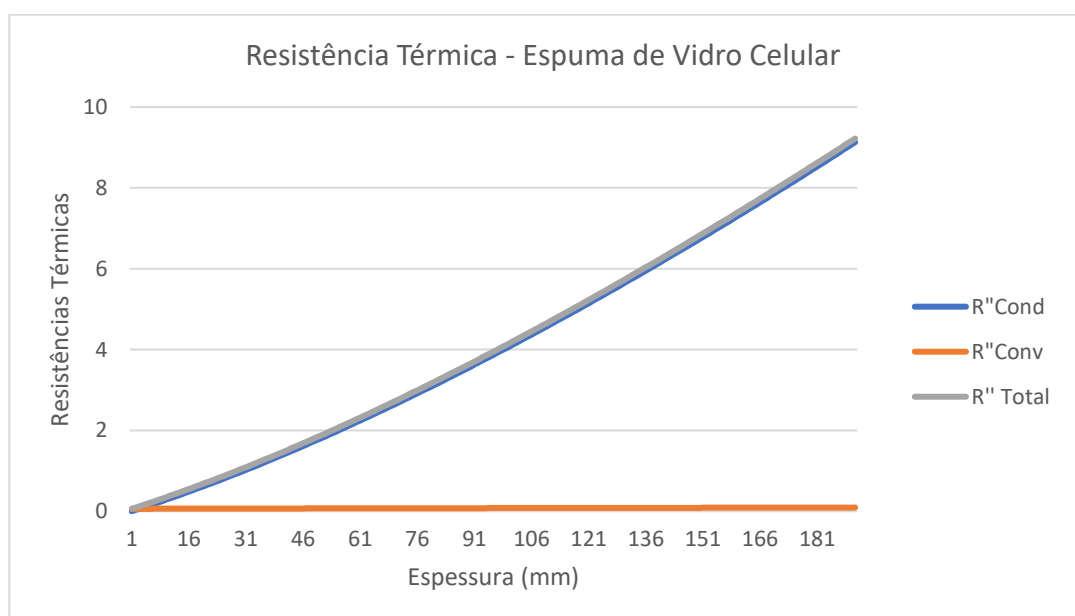


Figura 6 - Gráfico das Resistências térmicas – Espuma de Vidro Celular

No gráfico da Figura 7 é possível analisar como o fluxo de calor diminui a partir do aumento da espessura do material aplicado.

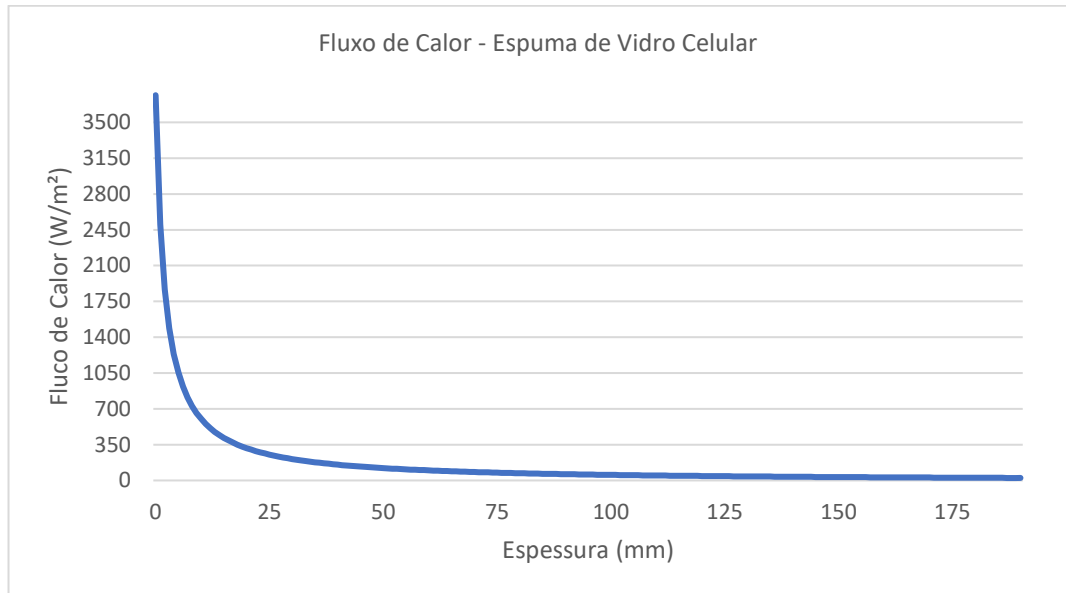


Figura 7 - Gráfico do Fluxo de Calor – Espuma de Vidro Celular

Quando comparado à espuma de poliuretano, o *Foam Glass* necessita de aproximadamente o dobro da espessura do PUF para garantir a estabilidade no fluxo de calor.

Em seguida é possível observar o perfil de temperatura no isolante em estudo pelo gráfico representado na Figura 8.

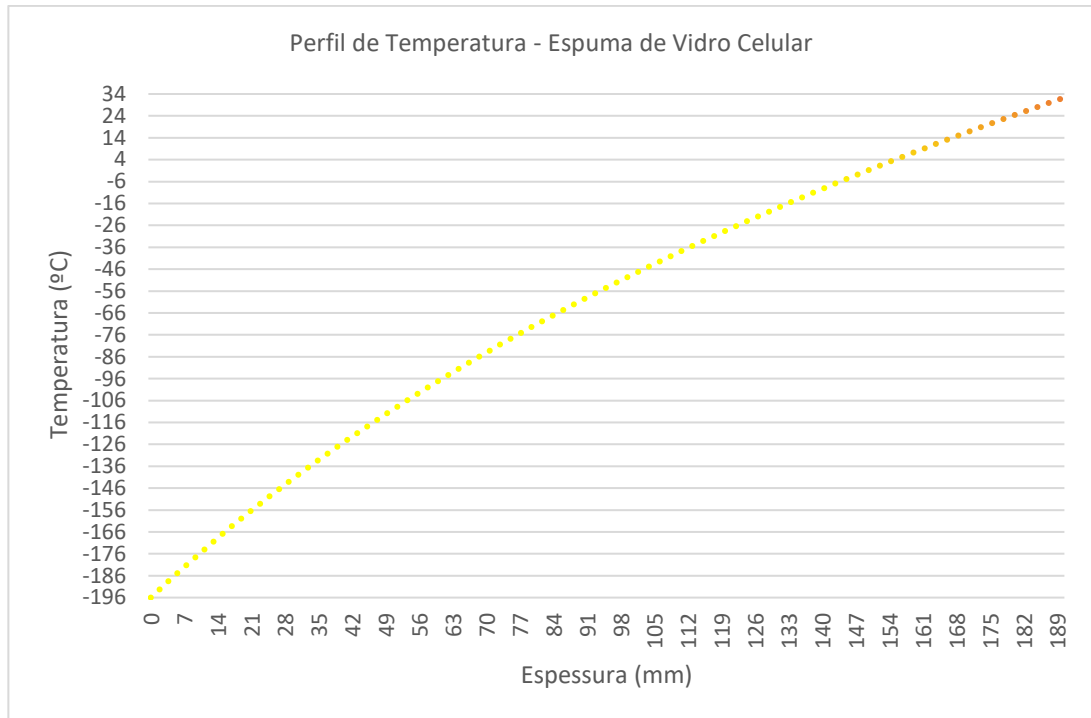


Figura 8 - Gráfico do Perfil de Temperatura – Espuma de Vidro Celular

Quando comparado ao poliuretano, a espuma de vidro apresenta maior necessidade de adição de material visto sua maior condutividade térmica em relação ao PUF. Logo, conforme esperado, o perfil de decaimento do fluxo de calor da espuma de vidro é menos acentuado que a do poliuretano.

4.2.3 Cryogel (Aerogel)

As principais características do *Cryogel* (Aerogel) que o torna ideal para possível isolante a ser analisado nesse trabalho são a sua baixa condutividade térmica, leveza, fogo resistente, hidrofóbico, durabilidade e temperatura de serviço de até -270°C (BAHADORI, 2014).

Por fim, passa-se agora aos resultados obtidos para o *Cryogel* (Aerogel) que possui condutividade térmica (k) de $0,015 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, sendo a menor entre os três materiais selecionados para estudo.

Conforme esperado seu raio crítico é bem menor que dos isolantes estudados anteriores, sendo

$$r_c = 0,91\text{mm}$$

Sabendo que o *Cryogel* possui a menor condutividade térmica e menor raio crítico, espera-se que a espessura ideal para atendimento ao projeto será menor do que as encontradas para os materiais anteriores, o que será facilmente observado.

A partir das iterações realizadas seguindo os mesmos passos da seção 4.2.1 obtém-se que a espessura para garantir o fluxo de calor abaixo de 25 W/m^2 é de 100 mm, entretanto essa espessura quando analisada pelo fluxo de condução com uma temperatura de superfície de 32°C não garante esse fluxo mínimo como se observa

$$q''_{cond}(32^\circ\text{C}) = 25,16 \text{ W/m}^2$$

Então passa-se para a espessura de 101mm e encontra-se a espessura do *Cryogel* que quando aplicada à tubulação garante um fluxo de calor abaixo do indicado e uma temperatura de superfície externa a 32°C conforme verifica-se que,

$$q''_{cond}(32^\circ\text{C}) = 24,86 \text{ W/m}^2$$

Dessa forma fica garantida que não ocorrerá condensação na superfície do isolamento térmico instalado.

No gráfico da Figura 9 pode-se observar o comportamento das resistências térmicas com a aplicação desse isolante.

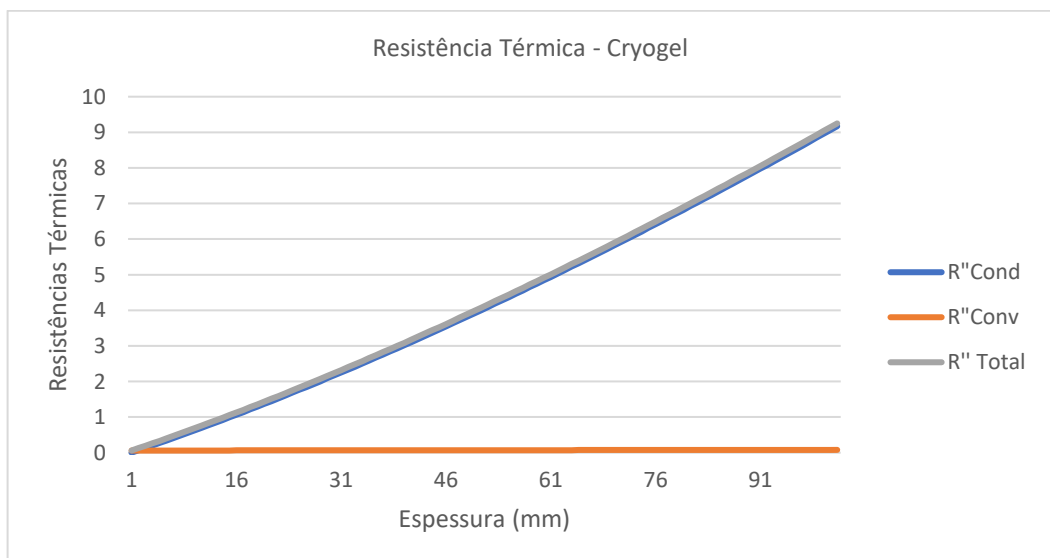


Figura 9 - Gráfico das Resistências térmicas – Cryogel

Como já era esperado, é possível verificar que conforme aumenta-se a espessura do material a resistência térmica de condução se eleva contribuindo igualmente para o aumento da resistência total.

Pode-se perceber, através do gráfico representado na Figura 10, como ocorre a redução no fluxo de calor conforme adiciona-se material ao duto.

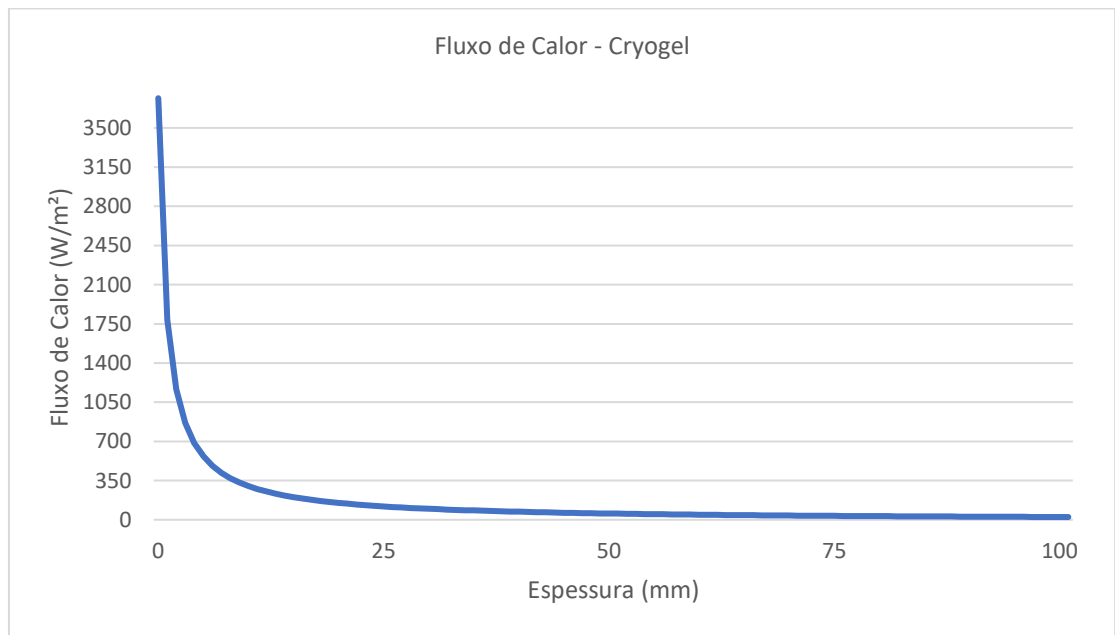


Figura 10 - Gráfico do Fluxo de Calor – Cryogel

Quando comparado aos isolantes analisados anteriormente, o *Cryogel* é o material que garante uma diminuição no ganho de calor mais brusca, garantindo uma estabilidade no fluxo de calor com a utilização de muito menos material

Por fim, a partir dos dados obtidos, temos o gráfico apresentado na Figura 11 que permite a visualização do perfil de temperatura no material isolante em estudo.

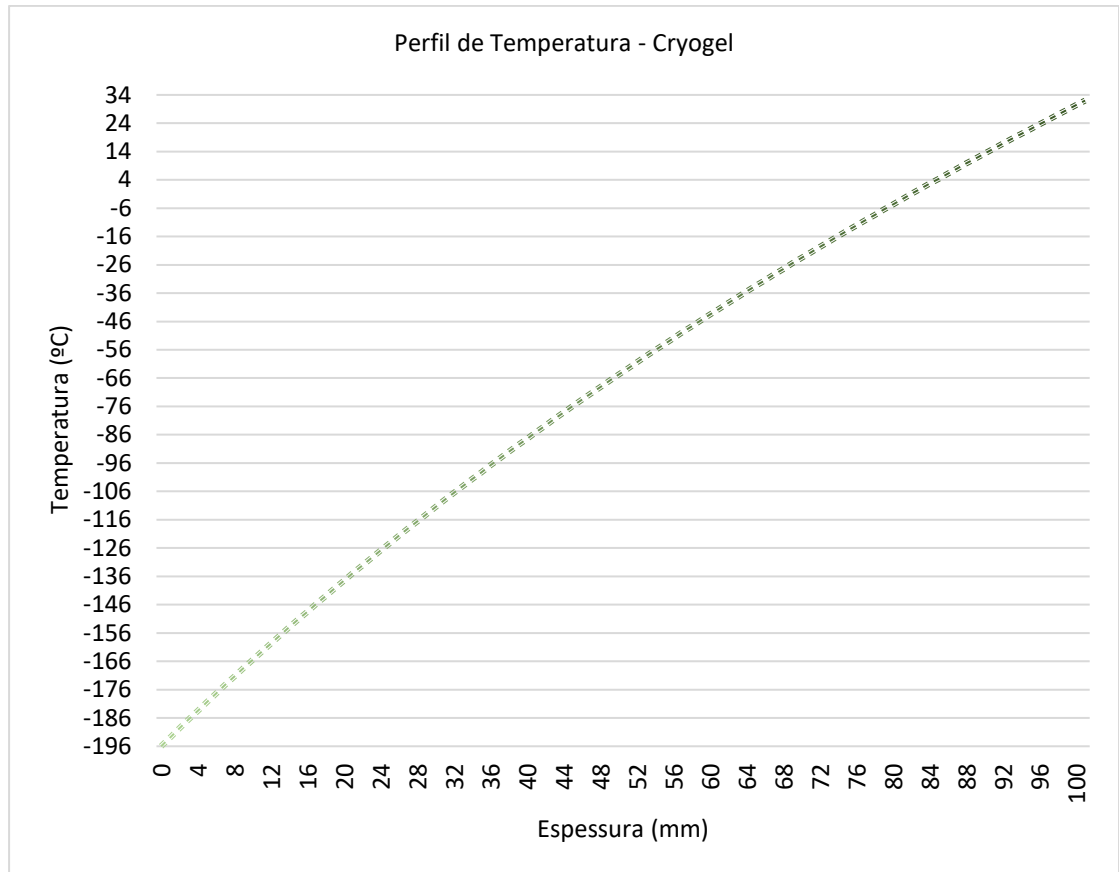


Figura 11 - Gráfico do Perfil de Temperatura – Cryogel

4.3 DISCUSSÃO ENTRE OS DIFERENTES TIPOS DE MATERIAIS.

Neste tópico serão realizadas algumas comparações entre os resultados apresentados a fim de determinar o material mais adequado para o isolamento térmico pretendido.

Os gráficos representados nas Figuras 12 e 13 mostram um comparativo entre as espessuras de cada material e o fluxo térmico a partir dessas espessuras.

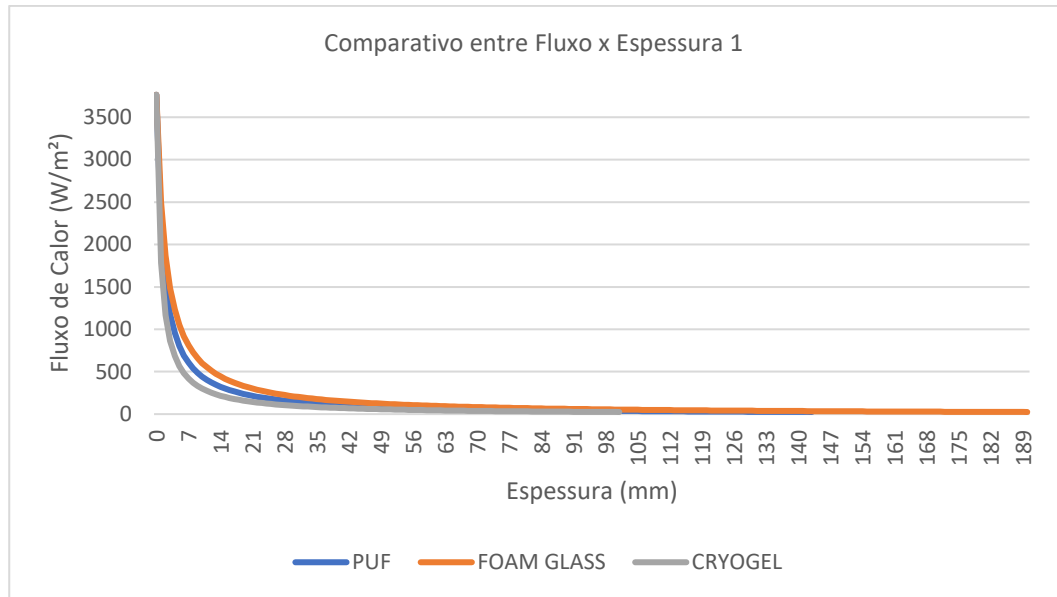


Figura 12 - Gráfico Comparativo entre Fluxo x Espessura 1

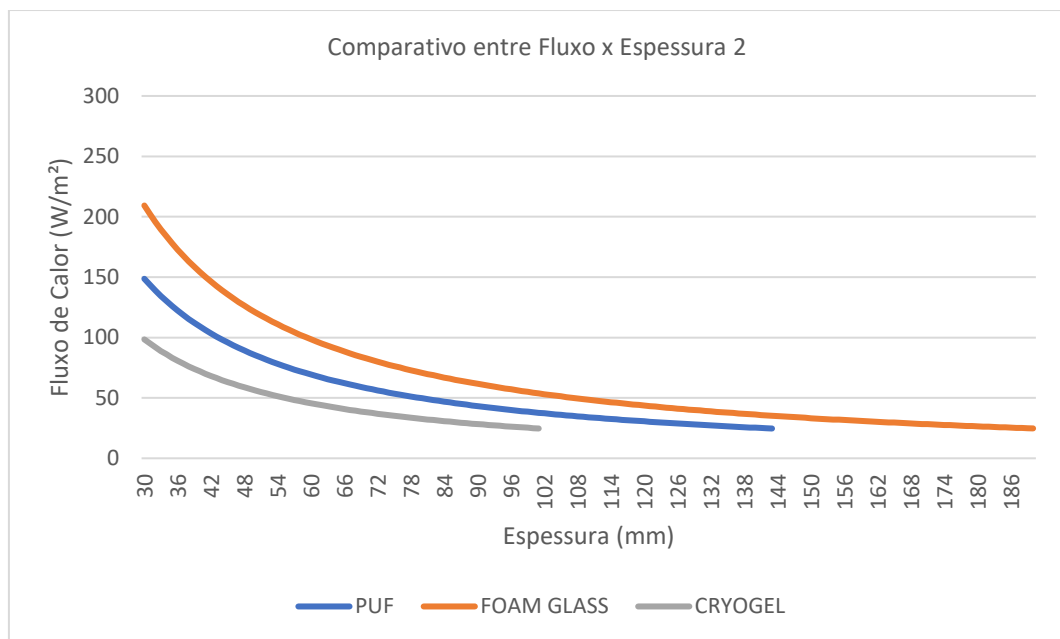


Figura 13 - Gráfico Comparativo entre Fluxo x Espessura 2

Conforme discutido previamente em resultados, os gráficos das Figuras 12 e 13 permitem visualizar um decaimento do fluxo de calor menos acentuado do *Foam Glass* e mais acentuado do *Cryogel*, para atingir o fluxo de calor máximo que pode passar pelo material conforme orientado por Young (2020), necessitando então o primeiro aqui citado de maior espessura conforme encontrado nos resultados.

O gráfico apresentado na Figura 14 compara o comportamento das temperaturas no interior do isolamento desde o raio interno até a superfície externa em cada um dos materiais em estudo.

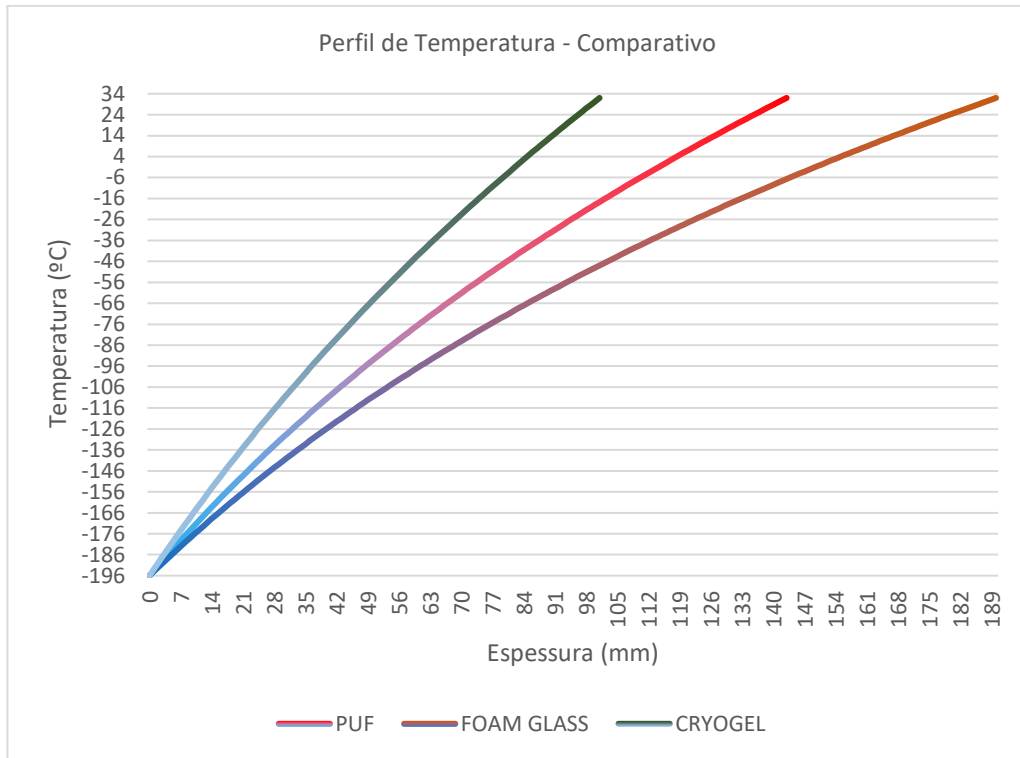


Figura 14 - Gráfico Comparativo entre os perfis de temperatura nos materiais

A comparação entre os perfis de temperaturas dos três materiais permite corroborar o resultado encontrado no gráfico da Figura 14, sendo o coeficiente angular da curva de temperatura do *Cryogel* maior que do Poliuretano que é maior que o de fibra de vidro, sendo $2,23 > 1,56 > 1,16$.

No Quadro 6 será realizada uma análise de algumas das propriedades técnicas de cada material.

Quadro 6 - Propriedades técnicas dos materiais isolantes

Material Propriedades	Espuma de Poliuretano (PUF)	Espuma de Vidro Celular (<i>Foam Glass</i>)	<i>Cryogel</i> (Aerogel)
Condutividade Térmica (W/m°C)	0,023	0,033	0,015
Resistência à água	Baixa	Líquida e Vapor	Hidrofóbico
Estabilidade dimensional	Sim	Sim	Sim
Resistente à fogo	Sim	Sim	Sim
Temperatura mínima de operação	- 200°C	- 268°C	- 270°C
Custo (R\$/m)	R\$ 175,66	R\$ 7.171,04	R\$ 7.995,63

Fonte: (Elaborado pelo autor)

Os custos apresentados no Quadro 6 levam em conta o metro linear de tubulação com o material isolante instalado já considerando as espessuras encontradas nos resultados apresentados nesta seção para atendimento às condições do projeto objeto deste trabalho.

O *Cryogel*, isolante de custo mais elevado, é 11% mais caro que a Espuma de Vidro Celular e mais de 45 vezes mais custoso que a Espuma de Poliuretano que é o material de menor preço entre os comparados neste trabalho.

Sendo assim, é necessário considerar a exigência de qualidade do produto final de um processo.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou os principais materiais isolantes existentes no mercado para atender os critérios de isolamento térmico para tubulações em unidades marítimas de armazenamento e transporte de gás natural liquefeito.

Pela análise técnica podemos identificar o *Cryogel* (Aerogel) como melhor isolante a ser utilizado tendo em vista que a espessura mínima necessária para atender os parâmetros do projeto é bem menor do que a dos demais materiais. Além disso, o fato de ser hidrofóbico mitiga bastante a ocorrência de CUI (*Corrosion under insulation*) garantindo uma maior integridade da tubulação.

Por outro lado, a Espuma Expansiva de Poliuretano é o isolante mais barato entre os materiais analisados, sendo, aproximadamente 46 vezes menos custoso que a Espuma de Vidro Celular, tornando a opção mais economicamente viável.

Diante de todo o exposto, é possível concluir que a escolha entre os três materiais depende de cada caso. Caso estejamos diante de um projeto que demande uma manutenção constante nas tubulações e/ou equipamentos, a Espuma de Poliuretano pode ser a escolha mais adequada por ser a de custo mais baixo. Na situação em que o projeto tenha a necessidade de um isolamento mais duradouro, pode-se escolher entre o *Foam Glass* e o *Cryogel*. Se dentre os requisitos estiverem a necessidade de economia de espaço o *Cryogel* se torna a opção mais viável das duas dada a sua baixa espessura necessária.

Para trabalhos futuros sugere-se realizar uma análise de viabilidade econômica para cada material apresentado levando em consideração não apenas o isolante, mas também os acessórios e revestimento metálico necessário para a instalação do isolamento térmico completo para o sistema.

REFERÊNCIAS

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **O Gás Natural Liquefeito no Brasil - Experiência da ANP na implantação dos projetos de importação de GNL**. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/livros-e-revistas/o-gas-natural-liquefeito-no-brasil-experiencia-da-anp-na-implantacao-dos-projetos-de-importacao-de-gnl>. Acesso em: 14 out. 2022.

BAHADORI, ALIREZA. **Thermal Insulation Handbook for the Oil, Gas, and Petrochemical Industries**. [s.l.]: Elsevier BV, 2014.

ÇENGEL, YUNUS A.; BOLES, MICHAEL A.. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: Amgh, 2013.

INCROPERA, F.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 7ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2014.

LIMA, FELIPE DE OLIVEIRA. **Avaliação de alternativas de isolamentos térmicos para prevenção de corrosão sob isolamento aplicado à indústria Offshore**. 2018. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/36886/36886.PDF>. Acesso em: 20 out. 2022.

MARCIANO, JORGE. **THERMAL SYSTEM INSULATION WITH PUF**. 2016. Disponível em: <https://www.shawcor.com/media-center/4368396338/thermal-insulation>. Acesso em: 22 out. 2022.

MOTTA, BRUNO CESAR SILVA. **Estudo do efeito do uso de polioli reciclado nas propriedades mecânicas da espuma rígida de poliuretano**. 2011. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-25082011-135739/pt-br.php>. Acesso em 17 nov. 2022.

PEREIRA, FERNANDA MARQUES. **Aproveitamento de gás natural na costa brasileira - estudo de caso da Baía de Santos**. 2007. 89 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11422/17980>. Acesso em: 25 out. 2022.

RIBEIRO, RAFAEL TEIXEIRA DA SILVA. **ESTRATÉGIAS COOPERATIVAS PARA O MERCADO BRASILEIRO DE GÁS NATURAL: UMA APLICAÇÃO DO MÉTODO**

DE SHAPLEY. 2017. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11422/8018>. Acesso em: 23 out. 2022.

SHAMMAZOV, I.; KARYAKINA, E. **The LNG Flow Simulation in Stationary Conditions through a Pipeline with Various Types of Insulating Coating.** Fluids 2023, 8, 68. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/fluids8020068>. Acesso em: 15 mar. 2023.

SILVA, ARTHUR GOMES GUEDES. **ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE CÂMARAS FRIGORÍFICAS COM DIFERENTES ISOLANTES TÉRMICOS.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [S. l.], 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/42990>. Acesso em: 17 out. 2022.

SILVA, DENNIS WILFREDO ROLDÁN. **Análise de Falhas e suas Consequências na Operação de Navios Transportadores de Gás Natural Liquefeito (GNL).** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3151/tde-26072013-124338/pt-br.php>. Acesso em: 11 nov. 2022.

SILVA, FILIPE MANUEL FERNANDES. **ESTUDO DE MATERIAIS DE ISOLAMENTO TÉRMICO INOVADORES** Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL - ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES CIVIS. [s.l.]: [s.n.], 2013. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/68641/2/26108.pdf>. Acesso em: 22 out. 2022.

YOUNG, JIM. **What are the basics for determining the necessary insulation thickness on an LNG pipe?** 2020. Disponível em: <https://www.jm.com/en/blog/2020/may/1-what-are-the-basics-for-determining-the-necessary-insulation-/>. Acesso em: 10 jan. 2023.

APÊNDICES

A1 – Tabela de cálculos de Re , h_c , R''_{Cond} , R''_{Conv} , R''_{Total} e q'' para a Espuma Expansível de Poliuretano

ESP (mm)	Re	C	m	h_c (W/m ² K)	R''_{Cond} (m ² K/W)	R''_{Conv} (m ² K/W)	R''_{Total} (m ² K/W)	q'' (W/m ²)
0	41760,34	0,26	0,6	16,50	0,00	0,061	0,06	3765,17
1	42141,58	0,26	0,6	16,44	0,04	0,061	0,10	2183,63
2	42522,82	0,26	0,6	16,38	0,09	0,061	0,15	1533,66
3	42904,07	0,26	0,6	16,32	0,13	0,061	0,19	1179,50
4	43285,31	0,26	0,6	16,26	0,18	0,061	0,24	956,68
5	43666,55	0,26	0,6	16,21	0,22	0,062	0,28	803,58
6	44047,79	0,26	0,6	16,15	0,27	0,062	0,33	691,93
7	44429,03	0,26	0,6	16,10	0,31	0,062	0,38	606,91
8	44810,28	0,26	0,6	16,04	0,36	0,062	0,42	540,03
9	45191,52	0,26	0,6	15,99	0,41	0,063	0,47	486,04
10	45572,76	0,26	0,6	15,93	0,45	0,063	0,52	441,55
11	45954,00	0,26	0,6	15,88	0,50	0,063	0,56	404,26
12	46335,25	0,26	0,6	15,83	0,55	0,063	0,61	372,57
13	46716,49	0,26	0,6	15,78	0,60	0,063	0,66	345,29
14	47097,73	0,26	0,6	15,72	0,65	0,064	0,71	321,58
15	47478,97	0,26	0,6	15,67	0,69	0,064	0,76	300,77
16	47860,22	0,26	0,6	15,62	0,74	0,064	0,81	282,37
17	48241,46	0,26	0,6	15,57	0,79	0,064	0,86	265,99
18	48622,70	0,26	0,6	15,53	0,84	0,064	0,91	251,30
19	49003,94	0,26	0,6	15,48	0,89	0,065	0,96	238,07
20	49385,19	0,26	0,6	15,43	0,94	0,065	1,01	226,09
21	49766,43	0,26	0,6	15,38	1,00	0,065	1,06	215,19
22	50147,67	0,26	0,6	15,33	1,05	0,065	1,11	205,23
23	50528,91	0,26	0,6	15,29	1,10	0,065	1,16	196,09
24	50910,16	0,26	0,6	15,24	1,15	0,066	1,22	187,69
25	51291,40	0,26	0,6	15,20	1,20	0,066	1,27	179,92
26	51672,64	0,26	0,6	15,15	1,26	0,066	1,32	172,74
27	52053,88	0,26	0,6	15,11	1,31	0,066	1,37	166,06
28	52435,12	0,26	0,6	15,06	1,36	0,066	1,43	159,85
29	52816,37	0,26	0,6	15,02	1,41	0,067	1,48	154,05
30	53197,61	0,26	0,6	14,98	1,47	0,067	1,54	148,63
31	53578,85	0,26	0,6	14,93	1,52	0,067	1,59	143,55
32	53960,09	0,26	0,6	14,89	1,58	0,067	1,64	138,78
33	54341,34	0,26	0,6	14,85	1,63	0,067	1,70	134,29
34	54722,58	0,26	0,6	14,81	1,69	0,068	1,75	130,06
35	55103,82	0,26	0,6	14,77	1,74	0,068	1,81	126,07
36	55485,06	0,26	0,6	14,73	1,80	0,068	1,87	122,29
37	55866,31	0,26	0,6	14,69	1,85	0,068	1,92	118,72
38	56247,55	0,26	0,6	14,65	1,91	0,068	1,98	115,33

39	56628,79	0,26	0,6	14,61	1,97	0,068	2,04	112,11
40	57010,03	0,26	0,6	14,57	2,02	0,069	2,09	109,06
41	57391,28	0,26	0,6	14,53	2,08	0,069	2,15	106,15
42	57772,52	0,26	0,6	14,49	2,14	0,069	2,21	103,38
43	58153,76	0,26	0,6	14,45	2,20	0,069	2,27	100,73
44	58535,00	0,26	0,6	14,41	2,25	0,069	2,32	98,21
45	58916,25	0,26	0,6	14,38	2,31	0,070	2,38	95,80
46	59297,49	0,26	0,6	14,34	2,37	0,070	2,44	93,49
47	59678,73	0,26	0,6	14,30	2,43	0,070	2,50	91,29
48	60059,97	0,26	0,6	14,27	2,49	0,070	2,56	89,17
49	60441,21	0,26	0,6	14,23	2,55	0,070	2,62	87,14
50	60822,46	0,26	0,6	14,20	2,61	0,070	2,68	85,19
51	61203,70	0,26	0,6	14,16	2,67	0,071	2,74	83,32
52	61584,94	0,26	0,6	14,12	2,73	0,071	2,80	81,52
53	61966,18	0,26	0,6	14,09	2,79	0,071	2,86	79,79
54	62347,43	0,26	0,6	14,06	2,85	0,071	2,92	78,13
55	62728,67	0,26	0,6	14,02	2,91	0,071	2,98	76,53
56	63109,91	0,26	0,6	13,99	2,97	0,071	3,04	74,98
57	63491,15	0,26	0,6	13,95	3,03	0,072	3,11	73,49
58	63872,40	0,26	0,6	13,92	3,10	0,072	3,17	72,05
59	64253,64	0,26	0,6	13,89	3,16	0,072	3,23	70,66
60	64634,88	0,26	0,6	13,85	3,22	0,072	3,29	69,32
61	65016,12	0,26	0,6	13,82	3,28	0,072	3,35	68,02
62	65397,37	0,26	0,6	13,79	3,35	0,073	3,42	66,77
63	65778,61	0,26	0,6	13,76	3,41	0,073	3,48	65,56
64	66159,85	0,26	0,6	13,73	3,47	0,073	3,54	64,38
65	66541,09	0,26	0,6	13,69	3,54	0,073	3,61	63,24
66	66922,34	0,26	0,6	13,66	3,60	0,073	3,67	62,14
67	67303,58	0,26	0,6	13,63	3,66	0,073	3,74	61,07
68	67684,82	0,26	0,6	13,60	3,73	0,074	3,80	60,03
69	68066,06	0,26	0,6	13,57	3,79	0,074	3,87	59,03
70	68447,31	0,26	0,6	13,54	3,86	0,074	3,93	58,05
71	68828,55	0,26	0,6	13,51	3,92	0,074	4,00	57,10
72	69209,79	0,26	0,6	13,48	3,99	0,074	4,06	56,18
73	69591,03	0,26	0,6	13,45	4,05	0,074	4,13	55,29
74	69972,27	0,26	0,6	13,42	4,12	0,075	4,19	54,42
75	70353,52	0,26	0,6	13,39	4,18	0,075	4,26	53,57
76	70734,76	0,26	0,6	13,36	4,25	0,075	4,33	52,75
77	71116,00	0,26	0,6	13,33	4,32	0,075	4,39	51,95
78	71497,24	0,26	0,6	13,31	4,38	0,075	4,46	51,17
79	71878,49	0,26	0,6	13,28	4,45	0,075	4,53	50,41
80	72259,73	0,26	0,6	13,25	4,52	0,075	4,59	49,67
81	72640,97	0,26	0,6	13,22	4,59	0,076	4,66	48,95
82	73022,21	0,26	0,6	13,19	4,65	0,076	4,73	48,25
83	73403,46	0,26	0,6	13,17	4,72	0,076	4,80	47,57
84	73784,70	0,26	0,6	13,14	4,79	0,076	4,87	46,90

85	74165,94	0,26	0,6	13,11	4,86	0,076	4,93	46,25
86	74547,18	0,26	0,6	13,09	4,93	0,076	5,00	45,61
87	74928,43	0,26	0,6	13,06	5,00	0,077	5,07	44,99
88	75309,67	0,26	0,6	13,03	5,06	0,077	5,14	44,39
89	75690,91	0,26	0,6	13,01	5,13	0,077	5,21	43,80
90	76072,15	0,26	0,6	12,98	5,20	0,077	5,28	43,22
91	76453,40	0,26	0,6	12,95	5,27	0,077	5,35	42,66
92	76834,64	0,26	0,6	12,93	5,34	0,077	5,42	42,10
93	77215,88	0,26	0,6	12,90	5,41	0,078	5,49	41,57
94	77597,12	0,26	0,6	12,88	5,48	0,078	5,56	41,04
95	77978,36	0,26	0,6	12,85	5,55	0,078	5,63	40,52
96	78359,61	0,26	0,6	12,83	5,62	0,078	5,70	40,02
97	78740,85	0,26	0,6	12,80	5,70	0,078	5,77	39,53
98	79122,09	0,26	0,6	12,78	5,77	0,078	5,84	39,04
99	79503,33	0,26	0,6	12,75	5,84	0,078	5,92	38,57
100	79884,58	0,26	0,6	12,73	5,91	0,079	5,99	38,11
101	80265,82	0,26	0,6	12,70	5,98	0,079	6,06	37,66
102	80647,06	0,26	0,6	12,68	6,05	0,079	6,13	37,22
103	81028,30	0,26	0,6	12,66	6,13	0,079	6,20	36,78
104	81409,55	0,26	0,6	12,63	6,20	0,079	6,28	36,36
105	81790,79	0,26	0,6	12,61	6,27	0,079	6,35	35,94
106	82172,03	0,26	0,6	12,59	6,34	0,079	6,42	35,53
107	82553,27	0,26	0,6	12,56	6,42	0,080	6,50	35,13
108	82934,52	0,26	0,6	12,54	6,49	0,080	6,57	34,74
109	83315,76	0,26	0,6	12,52	6,56	0,080	6,64	34,35
110	83697,00	0,26	0,6	12,49	6,64	0,080	6,72	33,98
111	84078,24	0,26	0,6	12,47	6,71	0,080	6,79	33,61
112	84459,49	0,26	0,6	12,45	6,78	0,080	6,86	33,24
113	84840,73	0,26	0,6	12,43	6,86	0,080	6,94	32,89
114	85221,97	0,26	0,6	12,40	6,93	0,081	7,01	32,54
115	85603,21	0,26	0,6	12,38	7,01	0,081	7,09	32,20
116	85984,45	0,26	0,6	12,36	7,08	0,081	7,16	31,86
117	86365,70	0,26	0,6	12,34	7,16	0,081	7,24	31,53
118	86746,94	0,26	0,6	12,32	7,23	0,081	7,31	31,20
119	87128,18	0,26	0,6	12,29	7,31	0,081	7,39	30,88
120	87509,42	0,26	0,6	12,27	7,38	0,081	7,46	30,57
121	87890,67	0,26	0,6	12,25	7,46	0,082	7,54	30,26
122	88271,91	0,26	0,6	12,23	7,53	0,082	7,62	29,96
123	88653,15	0,26	0,6	12,21	7,61	0,082	7,69	29,66
124	89034,39	0,26	0,6	12,19	7,69	0,082	7,77	29,37
125	89415,64	0,26	0,6	12,17	7,76	0,082	7,85	29,09
126	89796,88	0,26	0,6	12,15	7,84	0,082	7,92	28,80
127	90178,12	0,26	0,6	12,13	7,92	0,082	8,00	28,53
128	90559,36	0,26	0,6	12,11	7,99	0,083	8,08	28,25
129	90940,61	0,26	0,6	12,09	8,07	0,083	8,15	27,99
130	91321,85	0,26	0,6	12,07	8,15	0,083	8,23	27,72

131	91703,09	0,26	0,6	12,05	8,23	0,083	8,31	27,46
132	92084,33	0,26	0,6	12,03	8,30	0,083	8,39	27,21
133	92465,58	0,26	0,6	12,01	8,38	0,083	8,47	26,96
134	92846,82	0,26	0,6	11,99	8,46	0,083	8,54	26,71
135	93228,06	0,26	0,6	11,97	8,54	0,084	8,62	26,47
136	93609,30	0,26	0,6	11,95	8,62	0,084	8,70	26,23
137	93990,55	0,26	0,6	11,93	8,70	0,084	8,78	25,99
138	94371,79	0,26	0,6	11,91	8,77	0,084	8,86	25,76
139	94753,03	0,26	0,6	11,89	8,85	0,084	8,94	25,53
140	95134,27	0,26	0,6	11,87	8,93	0,084	9,02	25,31
141	95515,51	0,26	0,6	11,85	9,01	0,084	9,10	25,09
142	95896,76	0,26	0,6	11,83	9,09	0,085	9,18	24,87
143	96278,00	0,26	0,6	11,81	9,17	0,085	9,26	24,65

A2 – Tabela de cálculos do perfil de temperatura para a Espuma Expansiva de Poliuretano

ESP (mm)	Temp (°C)	ESP (mm)	Temp (°C)	ESP (mm)	Temp (°C)	ESP (mm)	Temp (°C)	ESP (mm)	Temp (°C)	ESP (mm)	Temp (°C)
0	-196,00	27	-135,86	54	-86,61	81	-44,90	108	-8,72	135	23,21
1	-193,52	28	-133,87	55	-84,94	82	-43,47	109	-7,47	136	24,33
2	-191,06	29	-131,89	56	-83,29	83	-42,05	110	-6,22	137	25,44
3	-188,62	30	-129,93	57	-81,64	84	-40,63	111	-4,98	138	26,54
4	-186,21	31	-127,98	58	-80,01	85	-39,22	112	-3,75	139	27,64
5	-183,82	32	-126,04	59	-78,38	86	-37,82	113	-2,52	140	28,74
6	-181,44	33	-124,12	60	-76,77	87	-36,43	114	-1,30	141	29,83
7	-179,09	34	-122,21	61	-75,16	88	-35,05	115	-0,08	142	30,92
8	-176,76	35	-120,32	62	-73,57	89	-33,67	116	1,14	143	32,00
9	-174,45	36	-118,43	63	-71,98	90	-32,30	117	2,34		
10	-172,15	37	-116,57	64	-70,40	91	-30,93	118	3,55		
11	-169,88	38	-114,71	65	-68,84	92	-29,58	119	4,74		
12	-167,62	39	-112,86	66	-67,28	93	-28,22	120	5,93		
13	-165,39	40	-111,03	67	-65,73	94	-26,88	121	7,12		
14	-163,17	41	-109,21	68	-64,18	95	-25,54	122	8,30		
15	-160,97	42	-107,41	69	-62,65	96	-24,21	123	9,48		
16	-158,79	43	-105,61	70	-61,13	97	-22,89	124	10,65		
17	-156,62	44	-103,83	71	-59,61	98	-21,57	125	11,82		
18	-154,47	45	-102,06	72	-58,10	99	-20,26	126	12,98		
19	-152,34	46	-100,30	73	-56,60	100	-18,95	127	14,13		
20	-150,22	47	-98,55	74	-55,11	101	-17,65	128	15,29		
21	-148,12	48	-96,81	75	-53,63	102	-16,36	129	16,43		
22	-146,04	49	-95,08	76	-52,15	103	-15,07	130	17,57		
23	-143,97	50	-93,36	77	-50,69	104	-13,79	131	18,71		
24	-141,92	51	-91,66	78	-49,23	105	-12,51	132	19,84		
25	-139,89	52	-89,96	79	-47,78	106	-11,24	133	20,97		
26	-137,86	53	-88,28	80	-46,33	107	-9,98	134	22,09		

A3 – Tabela de cálculos de Re, h_c , R''_{Cond} , R''_{Conv} , R''_{Total} e q'' para a Espuma de Vidro Celular

ESP (mm)	Re	C	m	h_c (W/m ² K)	R''_{Cond} (m ² K/W)	R''_{Conv} (m ² K/W)	R''_{Total} (m ² K/W)	q'' (W/m ²)
0	41760,34	0,26	0,6	16,50	0,00	0,06	0,06	3765,17
1	42141,58	0,26	0,6	16,44	0,03	0,06	0,09	2500,28
2	42522,82	0,26	0,6	16,38	0,06	0,06	0,12	1867,36
3	42904,07	0,26	0,6	16,32	0,09	0,06	0,15	1487,52
4	43285,31	0,26	0,6	16,26	0,12	0,06	0,18	1234,30
5	43666,55	0,26	0,6	16,21	0,15	0,06	0,22	1053,45
6	44047,79	0,26	0,6	16,15	0,19	0,06	0,25	917,85
7	44429,03	0,26	0,6	16,10	0,22	0,06	0,28	812,42
8	44810,28	0,26	0,6	16,04	0,25	0,06	0,31	728,12
9	45191,52	0,26	0,6	15,99	0,28	0,06	0,35	659,18
10	45572,76	0,26	0,6	15,93	0,32	0,06	0,38	601,76
11	45954,00	0,26	0,6	15,88	0,35	0,06	0,41	553,20
12	46335,25	0,26	0,6	15,83	0,38	0,06	0,45	511,61
13	46716,49	0,26	0,6	15,78	0,42	0,06	0,48	475,58
14	47097,73	0,26	0,6	15,72	0,45	0,06	0,51	444,09
15	47478,97	0,26	0,6	15,67	0,48	0,06	0,55	416,32
16	47860,22	0,26	0,6	15,62	0,52	0,06	0,58	391,65
17	48241,46	0,26	0,6	15,57	0,55	0,06	0,62	369,61
18	48622,70	0,26	0,6	15,53	0,59	0,06	0,65	349,78
19	49003,94	0,26	0,6	15,48	0,62	0,06	0,69	331,86
20	49385,19	0,26	0,6	15,43	0,66	0,06	0,72	315,58
21	49766,43	0,26	0,6	15,38	0,69	0,07	0,76	300,73
22	50147,67	0,26	0,6	15,33	0,73	0,07	0,79	287,14
23	50528,91	0,26	0,6	15,29	0,77	0,07	0,83	274,64
24	50910,16	0,26	0,6	15,24	0,80	0,07	0,87	263,12
25	51291,40	0,26	0,6	15,20	0,84	0,07	0,90	252,46
26	51672,64	0,26	0,6	15,15	0,87	0,07	0,94	242,57
27	52053,88	0,26	0,6	15,11	0,91	0,07	0,98	233,38
28	52435,12	0,26	0,6	15,06	0,95	0,07	1,02	224,81
29	52816,37	0,26	0,6	15,02	0,99	0,07	1,05	216,80
30	53197,61	0,26	0,6	14,98	1,02	0,07	1,09	209,30
31	53578,85	0,26	0,6	14,93	1,06	0,07	1,13	202,26
32	53960,09	0,26	0,6	14,89	1,10	0,07	1,17	195,64
33	54341,34	0,26	0,6	14,85	1,14	0,07	1,20	189,41
34	54722,58	0,26	0,6	14,81	1,18	0,07	1,24	183,53
35	55103,82	0,26	0,6	14,77	1,21	0,07	1,28	177,98
36	55485,06	0,26	0,6	14,73	1,25	0,07	1,32	172,73
37	55866,31	0,26	0,6	14,69	1,29	0,07	1,36	167,75
38	56247,55	0,26	0,6	14,65	1,33	0,07	1,40	163,03
39	56628,79	0,26	0,6	14,61	1,37	0,07	1,44	158,54
40	57010,03	0,26	0,6	14,57	1,41	0,07	1,48	154,27
41	57391,28	0,26	0,6	14,53	1,45	0,07	1,52	150,21

42	57772,52	0,26	0,6	14,49	1,49	0,07	1,56	146,34
43	58153,76	0,26	0,6	14,45	1,53	0,07	1,60	142,64
44	58535,00	0,26	0,6	14,41	1,57	0,07	1,64	139,11
45	58916,25	0,26	0,6	14,38	1,61	0,07	1,68	135,73
46	59297,49	0,26	0,6	14,34	1,65	0,07	1,72	132,50
47	59678,73	0,26	0,6	14,30	1,69	0,07	1,76	129,40
48	60059,97	0,26	0,6	14,27	1,73	0,07	1,80	126,43
49	60441,21	0,26	0,6	14,23	1,78	0,07	1,85	123,59
50	60822,46	0,26	0,6	14,20	1,82	0,07	1,89	120,85
51	61203,70	0,26	0,6	14,16	1,86	0,07	1,93	118,22
52	61584,94	0,26	0,6	14,12	1,90	0,07	1,97	115,70
53	61966,18	0,26	0,6	14,09	1,94	0,07	2,01	113,27
54	62347,43	0,26	0,6	14,06	1,99	0,07	2,06	110,92
55	62728,67	0,26	0,6	14,02	2,03	0,07	2,10	108,67
56	63109,91	0,26	0,6	13,99	2,07	0,07	2,14	106,49
57	63491,15	0,26	0,6	13,95	2,11	0,07	2,19	104,39
58	63872,40	0,26	0,6	13,92	2,16	0,07	2,23	102,37
59	64253,64	0,26	0,6	13,89	2,20	0,07	2,27	100,41
60	64634,88	0,26	0,6	13,85	2,24	0,07	2,32	98,52
61	65016,12	0,26	0,6	13,82	2,29	0,07	2,36	96,69
62	65397,37	0,26	0,6	13,79	2,33	0,07	2,40	94,92
63	65778,61	0,26	0,6	13,76	2,38	0,07	2,45	93,21
64	66159,85	0,26	0,6	13,73	2,42	0,07	2,49	91,55
65	66541,09	0,26	0,6	13,69	2,46	0,07	2,54	89,95
66	66922,34	0,26	0,6	13,66	2,51	0,07	2,58	88,39
67	67303,58	0,26	0,6	13,63	2,55	0,07	2,63	86,88
68	67684,82	0,26	0,6	13,60	2,60	0,07	2,67	85,42
69	68066,06	0,26	0,6	13,57	2,64	0,07	2,72	84,00
70	68447,31	0,26	0,6	13,54	2,69	0,07	2,76	82,62
71	68828,55	0,26	0,6	13,51	2,73	0,07	2,81	81,28
72	69209,79	0,26	0,6	13,48	2,78	0,07	2,85	79,98
73	69591,03	0,26	0,6	13,45	2,82	0,07	2,90	78,71
74	69972,27	0,26	0,6	13,42	2,87	0,07	2,95	77,48
75	70353,52	0,26	0,6	13,39	2,92	0,07	2,99	76,29
76	70734,76	0,26	0,6	13,36	2,96	0,07	3,04	75,12
77	71116,00	0,26	0,6	13,33	3,01	0,07	3,08	73,99
78	71497,24	0,26	0,6	13,31	3,06	0,08	3,13	72,89
79	71878,49	0,26	0,6	13,28	3,10	0,08	3,18	71,81
80	72259,73	0,26	0,6	13,25	3,15	0,08	3,22	70,76
81	72640,97	0,26	0,6	13,22	3,20	0,08	3,27	69,74
82	73022,21	0,26	0,6	13,19	3,24	0,08	3,32	68,75
83	73403,46	0,26	0,6	13,17	3,29	0,08	3,37	67,78
84	73784,70	0,26	0,6	13,14	3,34	0,08	3,41	66,84
85	74165,94	0,26	0,6	13,11	3,39	0,08	3,46	65,91
86	74547,18	0,26	0,6	13,09	3,43	0,08	3,51	65,01
87	74928,43	0,26	0,6	13,06	3,48	0,08	3,56	64,13

88	75309,67	0,26	0,6	13,03	3,53	0,08	3,61	63,28
89	75690,91	0,26	0,6	13,01	3,58	0,08	3,65	62,44
90	76072,15	0,26	0,6	12,98	3,63	0,08	3,70	61,62
91	76453,40	0,26	0,6	12,95	3,67	0,08	3,75	60,82
92	76834,64	0,26	0,6	12,93	3,72	0,08	3,80	60,04
93	77215,88	0,26	0,6	12,90	3,77	0,08	3,85	59,27
94	77597,12	0,26	0,6	12,88	3,82	0,08	3,90	58,53
95	77978,36	0,26	0,6	12,85	3,87	0,08	3,95	57,80
96	78359,61	0,26	0,6	12,83	3,92	0,08	4,00	57,08
97	78740,85	0,26	0,6	12,80	3,97	0,08	4,05	56,38
98	79122,09	0,26	0,6	12,78	4,02	0,08	4,10	55,70
99	79503,33	0,26	0,6	12,75	4,07	0,08	4,15	55,03
100	79884,58	0,26	0,6	12,73	4,12	0,08	4,20	54,37
101	80265,82	0,26	0,6	12,70	4,17	0,08	4,25	53,73
102	80647,06	0,26	0,6	12,68	4,22	0,08	4,30	53,10
103	81028,30	0,26	0,6	12,66	4,27	0,08	4,35	52,48
104	81409,55	0,26	0,6	12,63	4,32	0,08	4,40	51,88
105	81790,79	0,26	0,6	12,61	4,37	0,08	4,45	51,29
106	82172,03	0,26	0,6	12,59	4,42	0,08	4,50	50,71
107	82553,27	0,26	0,6	12,56	4,47	0,08	4,55	50,14
108	82934,52	0,26	0,6	12,54	4,52	0,08	4,60	49,58
109	83315,76	0,26	0,6	12,52	4,57	0,08	4,65	49,03
110	83697,00	0,26	0,6	12,49	4,63	0,08	4,71	48,50
111	84078,24	0,26	0,6	12,47	4,68	0,08	4,76	47,97
112	84459,49	0,26	0,6	12,45	4,73	0,08	4,81	47,46
113	84840,73	0,26	0,6	12,43	4,78	0,08	4,86	46,95
114	85221,97	0,26	0,6	12,40	4,83	0,08	4,91	46,45
115	85603,21	0,26	0,6	12,38	4,88	0,08	4,96	45,97
116	85984,45	0,26	0,6	12,36	4,94	0,08	5,02	45,49
117	86365,70	0,26	0,6	12,34	4,99	0,08	5,07	45,02
118	86746,94	0,26	0,6	12,32	5,04	0,08	5,12	44,55
119	87128,18	0,26	0,6	12,29	5,09	0,08	5,17	44,10
120	87509,42	0,26	0,6	12,27	5,15	0,08	5,23	43,66
121	87890,67	0,26	0,6	12,25	5,20	0,08	5,28	43,22
122	88271,91	0,26	0,6	12,23	5,25	0,08	5,33	42,79
123	88653,15	0,26	0,6	12,21	5,30	0,08	5,39	42,37
124	89034,39	0,26	0,6	12,19	5,36	0,08	5,44	41,95
125	89415,64	0,26	0,6	12,17	5,41	0,08	5,49	41,54
126	89796,88	0,26	0,6	12,15	5,46	0,08	5,55	41,14
127	90178,12	0,26	0,6	12,13	5,52	0,08	5,60	40,75
128	90559,36	0,26	0,6	12,11	5,57	0,08	5,65	40,36
129	90940,61	0,26	0,6	12,09	5,63	0,08	5,71	39,98
130	91321,85	0,26	0,6	12,07	5,68	0,08	5,76	39,60
131	91703,09	0,26	0,6	12,05	5,73	0,08	5,82	39,23
132	92084,33	0,26	0,6	12,03	5,79	0,08	5,87	38,87
133	92465,58	0,26	0,6	12,01	5,84	0,08	5,93	38,51

134	92846,82	0,26	0,6	11,99	5,90	0,08	5,98	38,16
135	93228,06	0,26	0,6	11,97	5,95	0,08	6,03	37,81
136	93609,30	0,26	0,6	11,95	6,01	0,08	6,09	37,47
137	93990,55	0,26	0,6	11,93	6,06	0,08	6,14	37,14
138	94371,79	0,26	0,6	11,91	6,12	0,08	6,20	36,81
139	94753,03	0,26	0,6	11,89	6,17	0,08	6,25	36,48
140	95134,27	0,26	0,6	11,87	6,23	0,08	6,31	36,16
141	95515,51	0,26	0,6	11,85	6,28	0,08	6,37	35,85
142	95896,76	0,26	0,6	11,83	6,34	0,08	6,42	35,54
143	96278,00	0,26	0,6	11,81	6,39	0,08	6,48	35,23
144	96659,24	0,26	0,6	11,79	6,45	0,08	6,53	34,93
145	97040,48	0,26	0,6	11,78	6,50	0,08	6,59	34,64
146	97421,73	0,26	0,6	11,76	6,56	0,09	6,64	34,34
147	97802,97	0,26	0,6	11,74	6,62	0,09	6,70	34,06
148	98184,21	0,26	0,6	11,72	6,67	0,09	6,76	33,77
149	98565,45	0,26	0,6	11,70	6,73	0,09	6,81	33,49
150	98946,70	0,26	0,6	11,68	6,78	0,09	6,87	33,22
151	99327,94	0,26	0,6	11,67	6,84	0,09	6,93	32,95
152	99709,18	0,26	0,6	11,65	6,90	0,09	6,98	32,68
153	100090,42	0,26	0,6	11,63	6,95	0,09	7,04	32,41
154	100471,67	0,26	0,6	11,61	7,01	0,09	7,10	32,15
155	100852,91	0,26	0,6	11,60	7,07	0,09	7,15	31,90
156	101234,15	0,26	0,6	11,58	7,13	0,09	7,21	31,64
157	101615,39	0,26	0,6	11,56	7,18	0,09	7,27	31,39
158	101996,64	0,26	0,6	11,54	7,24	0,09	7,33	31,15
159	102377,88	0,26	0,6	11,53	7,30	0,09	7,38	30,91
160	102759,12	0,26	0,6	11,51	7,35	0,09	7,44	30,67
161	103140,36	0,26	0,6	11,49	7,41	0,09	7,50	30,43
162	103521,60	0,26	0,6	11,48	7,47	0,09	7,56	30,20
163	103902,85	0,26	0,6	11,46	7,53	0,09	7,62	29,97
164	104284,09	0,26	0,6	11,44	7,59	0,09	7,67	29,74
165	104665,33	0,26	0,6	11,42	7,64	0,09	7,73	29,52
166	105046,57	0,26	0,6	11,41	7,70	0,09	7,79	29,29
167	105427,82	0,26	0,6	11,39	7,76	0,09	7,85	29,08
168	105809,06	0,26	0,6	11,38	7,82	0,09	7,91	28,86
169	106190,30	0,26	0,6	11,36	7,88	0,09	7,97	28,65
170	106571,54	0,26	0,6	11,34	7,94	0,09	8,02	28,44
171	106952,79	0,26	0,6	11,33	7,99	0,09	8,08	28,23
172	107334,03	0,26	0,6	11,31	8,05	0,09	8,14	28,03
173	107715,27	0,26	0,6	11,29	8,11	0,09	8,20	27,83
174	108096,51	0,26	0,6	11,28	8,17	0,09	8,26	27,63
175	108477,76	0,26	0,6	11,26	8,23	0,09	8,32	27,43
176	108859,00	0,26	0,6	11,25	8,29	0,09	8,38	27,23
177	109240,24	0,26	0,6	11,23	8,35	0,09	8,44	27,04
178	109621,48	0,26	0,6	11,22	8,41	0,09	8,50	26,85
179	110002,73	0,26	0,6	11,20	8,47	0,09	8,56	26,67

180	110383,97	0,26	0,6	11,18	8,53	0,09	8,62	26,48
181	110765,21	0,26	0,6	11,17	8,59	0,09	8,68	26,30
182	111146,45	0,26	0,6	11,15	8,65	0,09	8,74	26,12
183	111527,69	0,26	0,6	11,14	8,71	0,09	8,80	25,94
184	111908,94	0,26	0,6	11,12	8,77	0,09	8,86	25,76
185	112290,18	0,26	0,6	11,11	8,83	0,09	8,92	25,59
186	112671,42	0,26	0,6	11,09	8,89	0,09	8,98	25,42
187	113052,66	0,26	0,6	11,08	8,95	0,09	9,04	25,24
188	113433,91	0,26	0,6	11,06	9,01	0,09	9,10	25,08
189	113815,15	0,26	0,6	11,05	9,07	0,09	9,16	24,91
190	114196,39	0,26	0,6	11,03	9,13	0,09	9,22	24,75

A4 – Tabela de cálculos do perfil de temperatura para a Espuma de Vidro Celular

ESP (mm)	Temp (°C)	ESP (mm)	Temp (°C)	ESP (mm)	Temp (°C)	ESP (mm)	Temp (°C)
0	-196,00	27	-146,06	54	-105,17	81	-70,53
1	-193,94	28	-144,41	55	-103,78	82	-69,35
2	-191,90	29	-142,77	56	-102,41	83	-68,17
3	-189,88	30	-141,14	57	-101,05	84	-66,99
4	-187,87	31	-139,52	58	-99,69	85	-65,82
5	-185,88	32	-137,91	59	-98,34	86	-64,66
6	-183,91	33	-136,32	60	-97,00	87	-63,51
7	-181,96	34	-134,73	61	-95,67	88	-62,36
8	-180,02	35	-133,16	62	-94,34	89	-61,21
9	-178,10	36	-131,59	63	-93,02	90	-60,07
10	-176,20	37	-130,04	64	-91,71	91	-58,94
11	-174,31	38	-128,50	65	-90,41	92	-57,81
12	-172,44	39	-126,97	66	-89,12	93	-56,69
13	-170,58	40	-125,45	67	-87,83	94	-55,57
14	-168,74	41	-123,94	68	-86,55	95	-54,46
15	-166,91	42	-122,44	69	-85,28	96	-53,36
16	-165,10	43	-120,95	70	-84,01	97	-52,26
17	-163,30	44	-119,47	71	-82,75	98	-51,16
18	-161,52	45	-118,00	72	-81,50	99	-50,07
19	-159,75	46	-116,53	73	-80,25	100	-48,99
20	-157,99	47	-115,08	74	-79,02	101	-47,91
21	-156,25	48	-113,64	75	-77,78	102	-46,84
22	-154,52	49	-112,20	76	-76,56	103	-45,77
23	-152,80	50	-110,78	77	-75,34	104	-44,70
24	-151,10	51	-109,36	78	-74,13	105	-43,64
25	-149,41	52	-107,95	79	-72,92	106	-42,59
26	-147,73	53	-106,56	80	-71,73	107	-41,54
ESP (mm)	Temp (°C)	ESP (mm)	Temp (°C)	ESP (mm)	Temp (°C)	ESP (mm)	Temp (°C)

108	-40,50	135	-13,98	162	9,76	189	31,24
109	-39,46	136	-13,06	163	10,59	190	32,00
110	-38,42	137	-12,13	164	11,42		
111	-37,39	138	-11,22	165	12,25		
112	-36,37	139	-10,30	166	13,07		
113	-35,35	140	-9,39	167	13,89		
114	-34,33	141	-8,49	168	14,71		
115	-33,32	142	-7,58	169	15,53		
116	-32,31	143	-6,68	170	16,34		
117	-31,31	144	-5,79	171	17,15		
118	-30,31	145	-4,90	172	17,95		
119	-29,32	146	-4,01	173	18,76		
120	-28,33	147	-3,12	174	19,56		
121	-27,34	148	-2,24	175	20,36		
122	-26,36	149	-1,36	176	21,15		
123	-25,38	150	-0,49	177	21,94		
124	-24,41	151	0,38	178	22,73		
125	-23,44	152	1,25	179	23,52		
126	-22,48	153	2,12	180	24,30		
127	-21,52	154	2,98	181	25,09		
128	-20,56	155	3,84	182	25,86		
129	-19,61	156	4,69	183	26,64		
130	-18,66	157	5,54	184	27,41		
131	-17,72	158	6,39	185	28,18		
132	-16,78	159	7,24	186	28,95		
133	-15,84	160	8,08	187	29,72		
134	-14,91	161	8,92	188	30,48		

A6 – Tabela de cálculos de Re , h_c , R''_{Cond} , R''_{Conv} , R''_{Total} e q'' para o Cryogel (Aerogel)

ESP (mm)	Re	C	m	h_c (W/m ² K)	R''_{Cond} (m ² K/W)	R''_{Conv} (m ² K/W)	R''_{Total} (m ² K/W)	q'' (W/m ²)
0	41760,34	0,26	0,6	16,50	0,00	0,06	0,06	3765,17
1	42141,58	0,26	0,6	16,44	0,07	0,06	0,13	1785,62
2	42522,82	0,26	0,6	16,38	0,13	0,06	0,20	1166,72
3	42904,07	0,26	0,6	16,32	0,20	0,06	0,26	864,46
4	43285,31	0,26	0,6	16,26	0,27	0,06	0,33	685,36
5	43666,55	0,26	0,6	16,21	0,34	0,06	0,40	566,92
6	44047,79	0,26	0,6	16,15	0,41	0,06	0,47	482,78
7	44429,03	0,26	0,6	16,10	0,48	0,06	0,54	419,95
8	44810,28	0,26	0,6	16,04	0,55	0,06	0,61	371,24
9	45191,52	0,26	0,6	15,99	0,62	0,06	0,69	332,38
10	45572,76	0,26	0,6	15,93	0,70	0,06	0,76	300,67
11	45954,00	0,26	0,6	15,88	0,77	0,06	0,83	274,29
12	46335,25	0,26	0,6	15,83	0,84	0,06	0,91	252,02

13	46716,49	0,26	0,6	15,78	0,92	0,06	0,98	232,96
14	47097,73	0,26	0,6	15,72	0,99	0,06	1,05	216,47
15	47478,97	0,26	0,6	15,67	1,07	0,06	1,13	202,06
16	47860,22	0,26	0,6	15,62	1,14	0,06	1,21	189,37
17	48241,46	0,26	0,6	15,57	1,22	0,06	1,28	178,11
18	48622,70	0,26	0,6	15,53	1,29	0,06	1,36	168,04
19	49003,94	0,26	0,6	15,48	1,37	0,06	1,44	158,99
20	49385,19	0,26	0,6	15,43	1,45	0,06	1,51	150,82
21	49766,43	0,26	0,6	15,38	1,53	0,07	1,59	143,40
22	50147,67	0,26	0,6	15,33	1,60	0,07	1,67	136,63
23	50528,91	0,26	0,6	15,29	1,68	0,07	1,75	130,44
24	50910,16	0,26	0,6	15,24	1,76	0,07	1,83	124,75
25	51291,40	0,26	0,6	15,20	1,84	0,07	1,91	119,50
26	51672,64	0,26	0,6	15,15	1,92	0,07	1,99	114,65
27	52053,88	0,26	0,6	15,11	2,01	0,07	2,07	110,15
28	52435,12	0,26	0,6	15,06	2,09	0,07	2,15	105,96
29	52816,37	0,26	0,6	15,02	2,17	0,07	2,24	102,06
30	53197,61	0,26	0,6	14,98	2,25	0,07	2,32	98,42
31	53578,85	0,26	0,6	14,93	2,33	0,07	2,40	95,01
32	53960,09	0,26	0,6	14,89	2,42	0,07	2,49	91,81
33	54341,34	0,26	0,6	14,85	2,50	0,07	2,57	88,80
34	54722,58	0,26	0,6	14,81	2,59	0,07	2,65	85,97
35	55103,82	0,26	0,6	14,77	2,67	0,07	2,74	83,30
36	55485,06	0,26	0,6	14,73	2,76	0,07	2,83	80,78
37	55866,31	0,26	0,6	14,69	2,84	0,07	2,91	78,39
38	56247,55	0,26	0,6	14,65	2,93	0,07	3,00	76,13
39	56628,79	0,26	0,6	14,61	3,02	0,07	3,08	73,98
40	57010,03	0,26	0,6	14,57	3,10	0,07	3,17	71,95
41	57391,28	0,26	0,6	14,53	3,19	0,07	3,26	70,01
42	57772,52	0,26	0,6	14,49	3,28	0,07	3,35	68,16
43	58153,76	0,26	0,6	14,45	3,37	0,07	3,44	66,40
44	58535,00	0,26	0,6	14,41	3,46	0,07	3,53	64,72
45	58916,25	0,26	0,6	14,38	3,55	0,07	3,62	63,12
46	59297,49	0,26	0,6	14,34	3,64	0,07	3,71	61,59
47	59678,73	0,26	0,6	14,30	3,73	0,07	3,80	60,12
48	60059,97	0,26	0,6	14,27	3,82	0,07	3,89	58,71
49	60441,21	0,26	0,6	14,23	3,91	0,07	3,98	57,37
50	60822,46	0,26	0,6	14,20	4,00	0,07	4,07	56,07
51	61203,70	0,26	0,6	14,16	4,09	0,07	4,16	54,83
52	61584,94	0,26	0,6	14,12	4,18	0,07	4,25	53,64
53	61966,18	0,26	0,6	14,09	4,28	0,07	4,35	52,49
54	62347,43	0,26	0,6	14,06	4,37	0,07	4,44	51,39
55	62728,67	0,26	0,6	14,02	4,46	0,07	4,53	50,33
56	63109,91	0,26	0,6	13,99	4,56	0,07	4,63	49,30
57	63491,15	0,26	0,6	13,95	4,65	0,07	4,72	48,32
58	63872,40	0,26	0,6	13,92	4,75	0,07	4,82	47,36

59	64253,64	0,26	0,6	13,89	4,84	0,07	4,91	46,44
60	64634,88	0,26	0,6	13,85	4,94	0,07	5,01	45,56
61	65016,12	0,26	0,6	13,82	5,03	0,07	5,11	44,70
62	65397,37	0,26	0,6	13,79	5,13	0,07	5,20	43,87
63	65778,61	0,26	0,6	13,76	5,23	0,07	5,30	43,07
64	66159,85	0,26	0,6	13,73	5,32	0,07	5,40	42,29
65	66541,09	0,26	0,6	13,69	5,42	0,07	5,49	41,54
66	66922,34	0,26	0,6	13,66	5,52	0,07	5,59	40,81
67	67303,58	0,26	0,6	13,63	5,62	0,07	5,69	40,10
68	67684,82	0,26	0,6	13,60	5,72	0,07	5,79	39,42
69	68066,06	0,26	0,6	13,57	5,81	0,07	5,89	38,75
70	68447,31	0,26	0,6	13,54	5,91	0,07	5,99	38,11
71	68828,55	0,26	0,6	13,51	6,01	0,07	6,09	37,48
72	69209,79	0,26	0,6	13,48	6,11	0,07	6,19	36,88
73	69591,03	0,26	0,6	13,45	6,21	0,07	6,29	36,29
74	69972,27	0,26	0,6	13,42	6,32	0,07	6,39	35,71
75	70353,52	0,26	0,6	13,39	6,42	0,07	6,49	35,15
76	70734,76	0,26	0,6	13,36	6,52	0,07	6,59	34,61
77	71116,00	0,26	0,6	13,33	6,62	0,07	6,70	34,08
78	71497,24	0,26	0,6	13,31	6,72	0,08	6,80	33,57
79	71878,49	0,26	0,6	13,28	6,83	0,08	6,90	33,07
80	72259,73	0,26	0,6	13,25	6,93	0,08	7,00	32,58
81	72640,97	0,26	0,6	13,22	7,03	0,08	7,11	32,11
82	73022,21	0,26	0,6	13,19	7,14	0,08	7,21	31,64
83	73403,46	0,26	0,6	13,17	7,24	0,08	7,32	31,19
84	73784,70	0,26	0,6	13,14	7,34	0,08	7,42	30,75
85	74165,94	0,26	0,6	13,11	7,45	0,08	7,53	30,32
86	74547,18	0,26	0,6	13,09	7,55	0,08	7,63	29,91
87	74928,43	0,26	0,6	13,06	7,66	0,08	7,74	29,50
88	75309,67	0,26	0,6	13,03	7,77	0,08	7,84	29,10
89	75690,91	0,26	0,6	13,01	7,87	0,08	7,95	28,71
90	76072,15	0,26	0,6	12,98	7,98	0,08	8,06	28,33
91	76453,40	0,26	0,6	12,95	8,08	0,08	8,16	27,96
92	76834,64	0,26	0,6	12,93	8,19	0,08	8,27	27,60
93	77215,88	0,26	0,6	12,90	8,30	0,08	8,38	27,24
94	77597,12	0,26	0,6	12,88	8,41	0,08	8,48	26,89
95	77978,36	0,26	0,6	12,85	8,52	0,08	8,59	26,56
96	78359,61	0,26	0,6	12,83	8,62	0,08	8,70	26,22
97	78740,85	0,26	0,6	12,80	8,73	0,08	8,81	25,90
98	79122,09	0,26	0,6	12,78	8,84	0,08	8,92	25,58
99	79503,33	0,26	0,6	12,75	8,95	0,08	9,03	25,27
100	79884,58	0,26	0,6	12,73	9,06	0,08	9,14	24,97
101	80265,82	0,26	0,6	12,70	9,17	0,08	9,25	24,67

A7 – Tabela de cálculos do perfil de temperatura para a Espuma de Vidro Celular

ESP (mm)	Temp (°C)	ESP (mm)	Temp (°C)	ESP (mm)	Temp (°C)
0	-196,00	42	-82,74	84	2,62
1	-192,83	43	-80,45	85	4,42
2	-189,69	44	-78,17	86	6,21
3	-186,57	45	-75,90	87	7,99
4	-183,48	46	-73,65	88	9,76
5	-180,42	47	-71,42	89	11,52
6	-177,39	48	-69,19	90	13,28
7	-174,38	49	-66,99	91	15,02
8	-171,40	50	-64,79	92	16,76
9	-168,45	51	-62,61	93	18,48
10	-165,51	52	-60,44	94	20,20
11	-162,61	53	-58,29	95	21,91
12	-159,73	54	-56,15	96	23,61
13	-156,87	55	-54,02	97	25,31
14	-154,03	56	-51,91	98	26,99
15	-151,22	57	-49,81	99	28,67
16	-148,43	58	-47,72	100	30,34
17	-145,66	59	-45,64	101	32,00
18	-142,91	60	-43,58		
19	-140,18	61	-41,53		
20	-137,48	62	-39,49		
21	-134,80	63	-37,46		
22	-132,13	64	-35,44		
23	-129,49	65	-33,44		
24	-126,87	66	-31,44		
25	-124,27	67	-29,46		
26	-121,68	68	-27,49		
27	-119,12	69	-25,53		
28	-116,57	70	-23,58		
29	-114,04	71	-21,64		
30	-111,53	72	-19,71		
31	-109,04	73	-17,80		
32	-106,57	74	-15,89		
33	-104,11	75	-13,99		
34	-101,67	76	-12,11		
35	-99,25	77	-10,23		
36	-96,84	78	-8,37		
37	-94,45	79	-6,51		
38	-92,08	80	-4,67		
39	-89,72	81	-2,83		
40	-87,38	82	-1,00		
41	-85,05	83	0,81		