

9.

Análise dos Resultados

9.1.

Comparação estado gasoso e líquido

A parte de comparação entre o estado líquido e gasoso tinha como objetivo justificar a escolha do transporte de CO₂ na forma líquida (na fase densa) ao invés de transportá-lo como gás, que é seu estado natural nas CNTP. As vazões em dutos de CO₂ são muito variáveis, mas raramente menores que 500 ton/d. Atualmente, já existem dutos em operação com vazões da ordem de 20000 ton/d ou mais, porém a necessidade de limitar a pressão máxima, no caso do transporte de CO₂ gasoso, é um grande impasse no seu uso.

Tabela 10 - Resumo da comparação entre o transporte líquido e gasoso de CO₂

Diâmetro [pol]	Temperatura [°C]	Vazão [ton/d]	ΔP Líquido [kgf/cm ²]	ΔP Gás [kgf/cm ²]	N° Extra de EComps. (Gás)
10	10	500	0.40	11.87	0
		2000	5.70	23.35	9
	20	500	0.43	7.52	0
		2000	6.21	27.66	5
	30	500	0.49	4.75	0
		2000	7.07	49.92	2
16	10	500	0.06	1.36	0
		2000	0.83	13.42	1
	20	500	0.06	0.93	0
		2000	0.90	20.60	0
	30	500	0.07	0.60	0
		2000	1.03	12.08	0
20	10	500	0.02	0.40	0
		2000	0.26	6.99	0
	20	500	0.02	0.28	0
		2000	0.28	4.60	0
	30	500	0.02	0.18	0
		2000	0.31	2.91	0

Os casos estudados, baseados em duas vazões comuns em dutos de carbono, foram utilizados para oferecer um comparativo entre as duas opções. A Tabela 10 oferece um resumo dos resultados obtidos. Como a vazão mássica foi fixada, foi analisado, portanto, as pressões necessárias para atender tais vazões. A pressão no

recebimento foi baseada em bibliografia, como visto no item 8.1, para garantir certa veracidade nos resultados obtidos. Para facilitar a comparação, utilizou-se o diferencial de pressão obtido, permitindo assim verificar a perda de carga de cada escoamento.

O grande limitante da operação com o CO₂ na forma gasosa é a pressão limite devido à pressão de vapor. Ao aumentar a temperatura do caso estudado, este limite aumenta, permitindo assim um escoamento menos restringido. Entretanto, a diferença de pressão necessária continua muito alta, devido à alta vazão volumétrica necessária.

No caso do CO₂ na forma gasosa, foi apresentado número extra de estações de compressão (EComps) ao longo do duto para atingir tal vazão. Os compressores necessários nos casos demonstrados foram modelados como compressores ideais, pois não havia um interesse grande na sua eficiência. Sua função era primariamente demonstrar a necessidade das estações e atender os limites de pressão necessários.

No caso dos líquidos, a diferença de pressão para as vazões encontradas são bem menores. Como em sua grande parte a compressão do CO₂ para a fase líquida é de responsabilidade da parte de captura, as empresas de transporte de CO₂ não tem de lidar com esse custo. Alguns métodos de separação do CO₂ dos gases neles inclusos (como o gás natural) já necessitam da liquefação do mesmo.

Mesmo no caso da liquefação ser de responsabilidade da operadora do duto, o ganho com o duto menor e alta capacidade de vazão justificaria a escolha. Pela Tabela 10 podemos ver, por exemplo, que no melhor dos casos para a simulação de gás, ou seja, maior diâmetro e alta temperatura, a perda de carga no duto de líquido é da ordem de 10 vezes menor que a do duto de gás.

9.2.

Caso Real – Exterior

O primeiro caso estudado, de um conjunto de dutos para o EOR em um poço na costa do Vietnã permitiu avaliar e validar os dados encontrados nas simulações de CO₂ líquido. Como a grande maioria dos dutos no mundo trabalha

parcialmente ou totalmente com o CO₂ supercrítico, existe certa dificuldade em validar os modelos encontrados. Existem, entretanto, algumas divergências encontradas nos resultados, mas elas podem ser explicadas pelos dados tomados como premissas, desde a faixa do duto utilizada (retirada do Google Earth e, portanto, sem a precisão adequada) quanto à espessura utilizada nas simulações.

Novamente neste caso trabalhou-se com uma vazão constante e pressão de recebimento conhecida. Entretanto, um diferencial importante foi do escoamento ocorrer em não um, mas dois dutos em paralelos de diâmetros distintos. De acordo com o projeto (Mitsubishi – 2004)[61], as vazões para os dutos de 16” e 20” esperadas seriam de 9000 e 21000 ton/d respectivamente.

Entretanto, as simulações retornaram proporções um pouco diferente, como mostra a Tabela 11, com um erro aproximado de 10%. Para se aproximar mais da realidade, alterou-se a espessura do duto de 20” de 0,500” para 0,312”, obtendo os resultados da Tabela 12, que possui um erro aproximado de 8%. Como pode ser percebido, a variação da espessura afeta bastante a simulação neste quesito, mas sem saber a relação exata das espessuras, qualquer alternativa é pura especulação e não totalmente pertinente ao estudo em pauta. Isso se deve tanto a perda de carga sofrida com cada espessura, como com os efeitos da temperatura em uma vazão menor ou maior.

Tabela 11 - Resultados Iniciais de Vazão

Caso	Vazão Obtida		Vazão Esperada	Erro
	kg/s	ton/d	ton/d	%
16", 4°C	121.60	10507	9000	16.74%
16", 8°C	121.58	10504		16.71%
16", 12°C	121.51	10498		16.65%
16", 18°C	121.42	10491		16.57%
20", 4°C	224.37	19386	21000	7.69%
20", 8°C	224.40	19388		7.68%
20", 12°C	224.47	19394		7.65%
20", 18°C	224.55	19401		7.61%

Tabela 12 - Resultado após alteração de espessura

Caso	Vazão Obtida		Vazão Esperada	Erro
	kg/s	ton/d	ton/d	%
16", 4°C	117.50	10152	9000	12.80%
16", 8°C	117.47	10150		12.78%
16", 12°C	117.40	10144		12.71%
16", 18°C	117.32	10136		12.63%
20", 4°C	228.79	19767	21000	5.87%
20", 8°C	228.82	19770		5.86%
20", 12°C	228.89	19776		5.83%
20", 18°C	228.97	19783		5.80%

Mesmo com a pequena diferença de vazão, que pode ser justificada pelas divergências e falta de informações necessárias, podemos concluir que a modelagem está correta utilizando o software indicado. Outro ponto de interesse a perceber é que a variação de temperatura no trecho submarino neste caso afetou pouca a vazão calculada para as condições de custódia utilizadas.

Entretanto, ao analisar melhor os valores de vazão reais nos dutos em cada caso, assim como a variação de temperatura, pode-se observar um resultado interessante. As Figura 46 e 45 apresentam a variação da temperatura ao longo do escoamento em cada duto. Essa variação tem, por consequência, um efeito óbvio na vazão volumétrica do duto, devido às propriedades do CO₂. A Figura 48 e a Figura 49 apresentam o efeito da variação da temperatura e pressão ao longo do duto na vazão volumétrica e a Figura 50 e a Figura 51 apresentam o efeito da variação da temperatura e pressão ao longo do duto na massa específica.

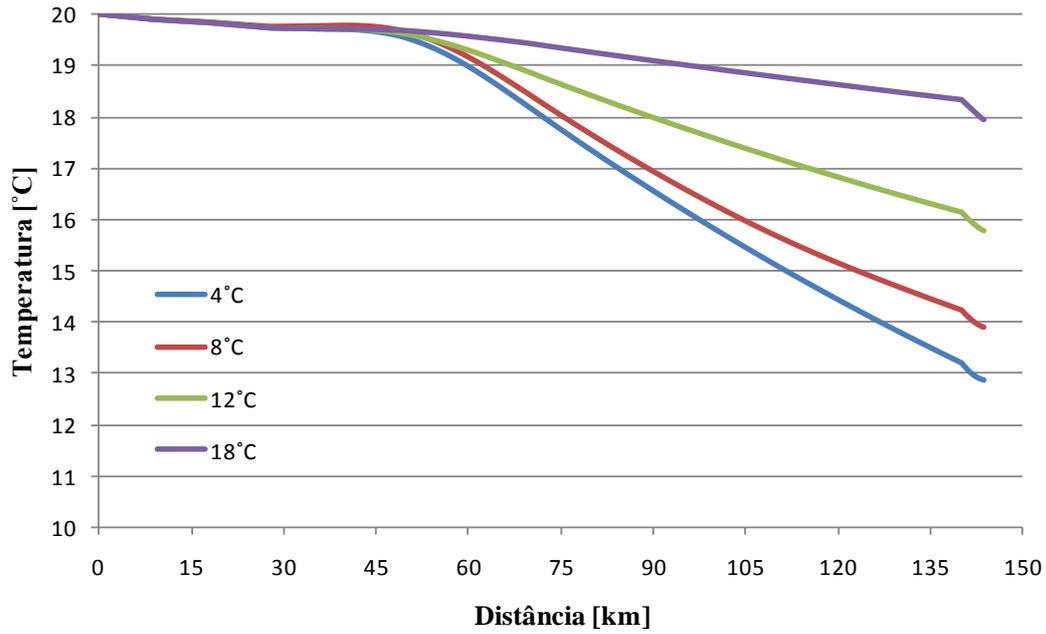


Figura 46 - Temperatura ao longo do duto de 16" de acordo com a temperatura marítima

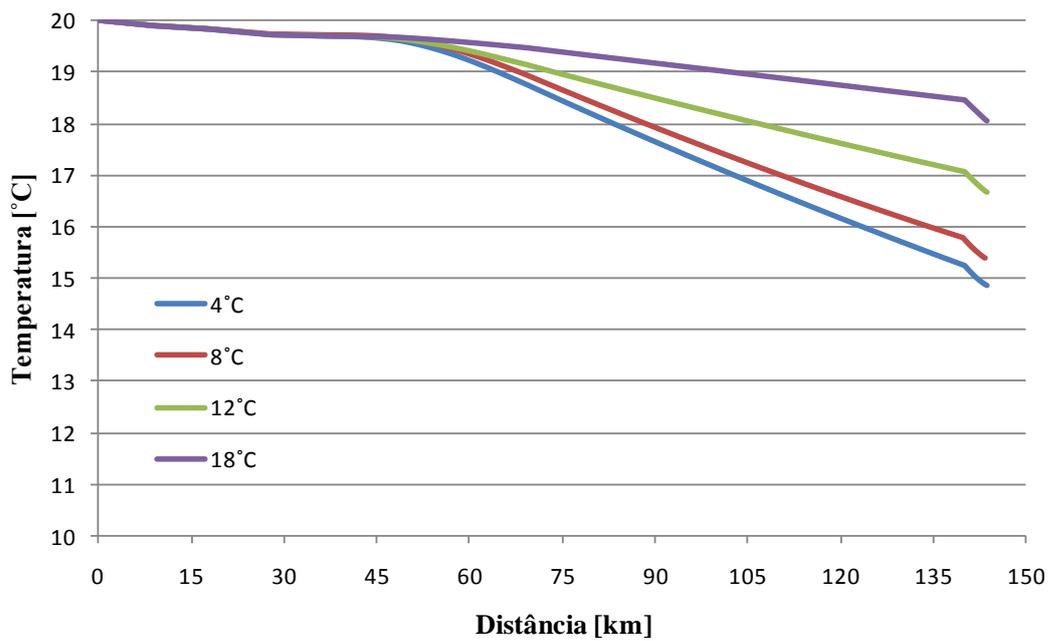


Figura 47 - Temperatura ao longo do duto de 20" de acordo com a temperatura marítima

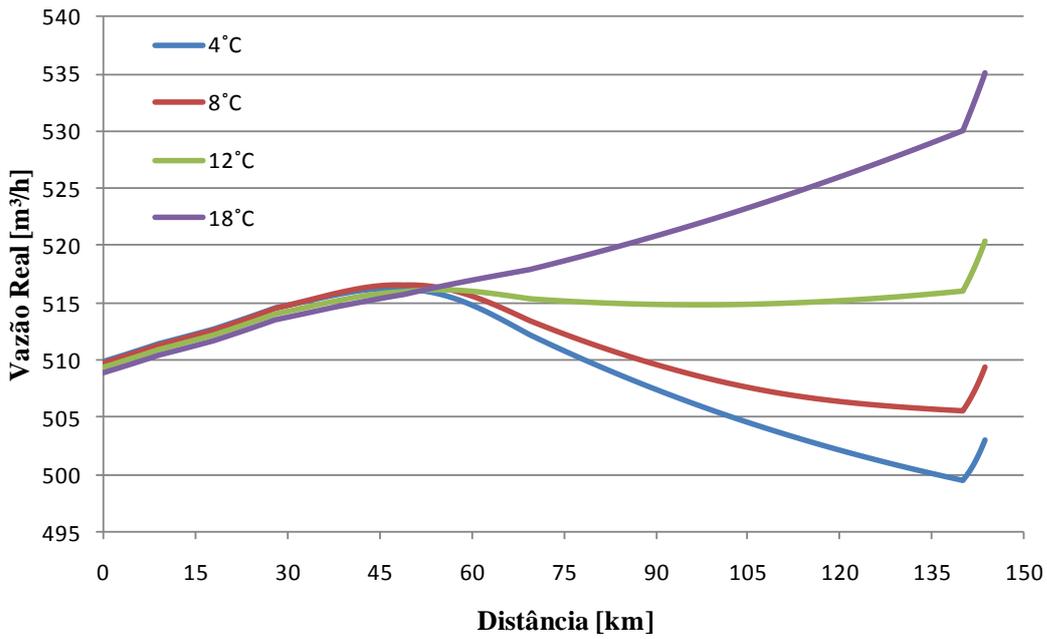


Figura 48 - Vazão real ao longo do duto de 16" em função da temperatura marítima

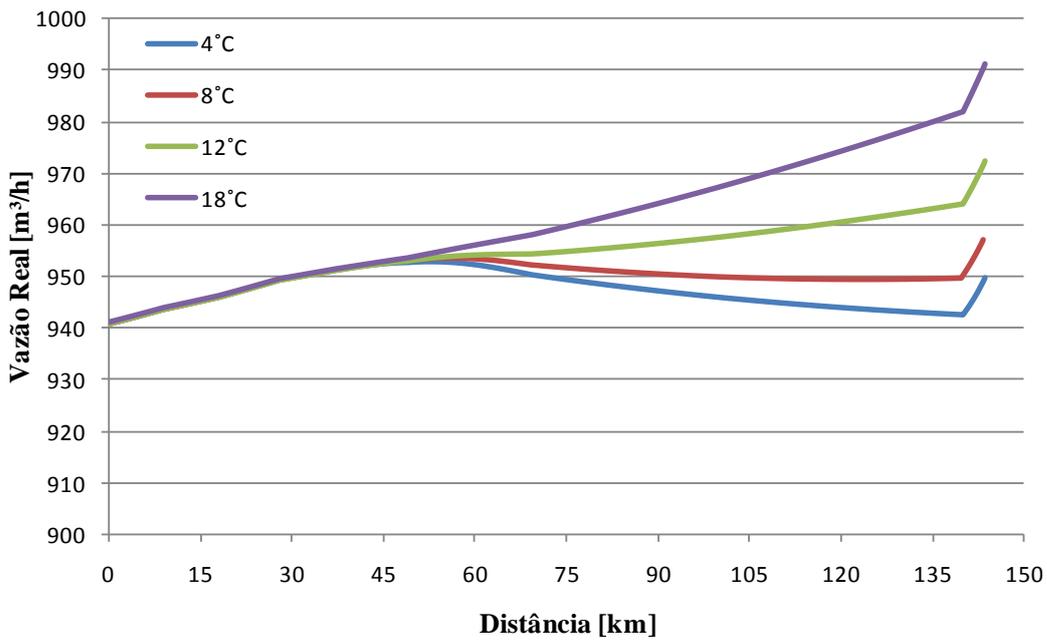


Figura 49 - Vazão real ao longo do duto de 20" em função da temperatura marítima

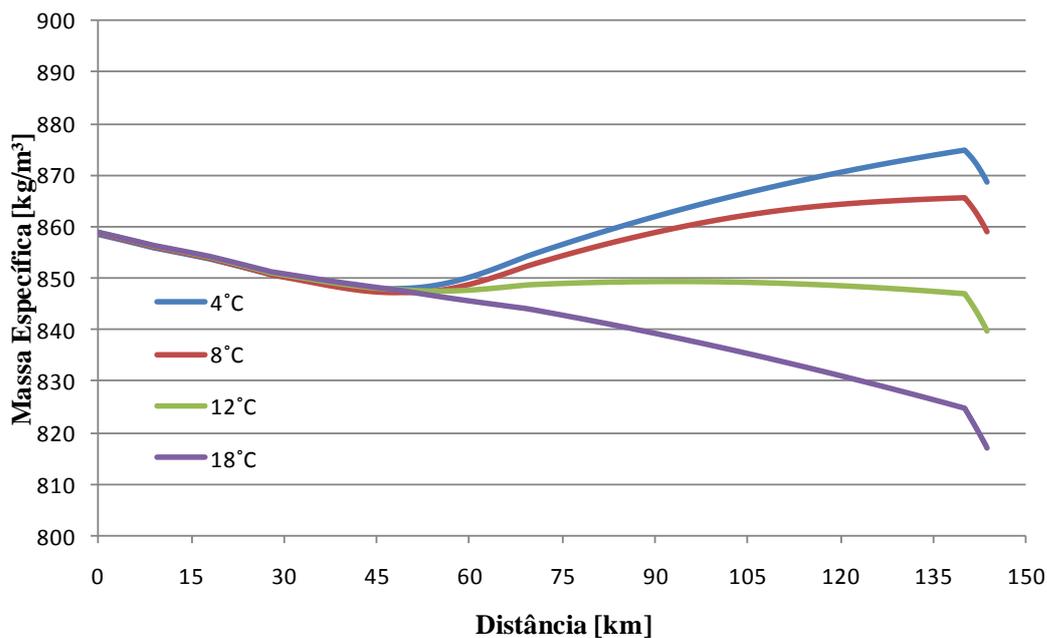


Figura 50 - Massa específica ao longo do duto de 16" em função da temperatura marítima

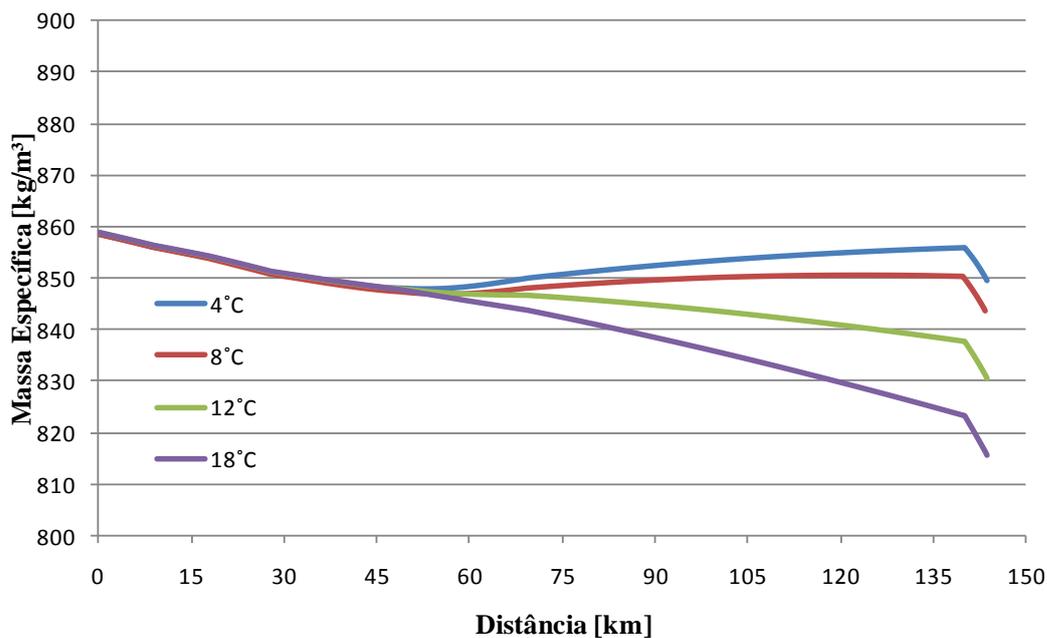


Figura 51 - Massa específica ao longo do duto de 20" em função da temperatura marítima

Como se pode perceber pela Figura 48 e pela Figura 49, dependendo da relação de queda da temperatura e da queda de pressão, a vazão volumétrica (e a velocidade) do escoamento podem ter comportamentos distintos. Em ambos os dutos, a temperatura de 18°C, a vazão aumenta ao longo do duto. Entretanto, na temperatura de 4°C, após a entrada no trecho submerso, a vazão passa a cair, pois a mudança de temperatura afeta mais o fluido que a queda de pressão. No caso de

12°C, os dutos apresentam comportamentos diferentes, onde no duto menor a vazão tende a se estabilizar, mantendo um balanço entre a variação de pressão e temperatura, e no caso do duto maior a vazão continua a subir, entretanto a uma taxa bem menor que a do trecho terrestre.

9.3.

Caso Real – Brasil

O caso inicialmente tinha como intuito ser mais uma verificação da modelagem de dutos de carbono utilizada nesta dissertação. Entretanto, havia um problema. A temperatura e pressão de entrada do fluido no sistema (45°C e 120kgf/cm²) o coloca bem adentro da zona de fluido supercrítico, de acordo com a Figura 5. Neste caso, a modelagem utilizada tanto para líquido quanto para gás não atendia ao caso estudado. Como foi apresentado no item 8.2.2, tentou-se, utilizando-se da entrada de dados de estado na forma de tabela TABLE e dados conhecidos de temperatura e pressão do CO₂ supercrítico se aproximar o máximo possível das condições de contorno obtidas. Entretanto, devido à particularidade do CO₂ de possuir uma capacidade térmica variável e da limitação da equação de estado quanto a isso, os resultados encontrados forem aquém do satisfatório, com uma vazão 3 vezes maior que a vazão máxima apresentada por (Furley, S.J.S.; Carvalho, L.D.C. – 2007)[63]. Além disso, durante as simulações, o CO₂ passou de supercrítico para líquido, o que dificultou ainda mais os cálculos.

Um grande número de estudos existentes na literatura considera o CO₂ como um fluido incompressível em certas faixas de pressão e temperatura, como mencionado no item 8.2.2. Entretanto, essa premissa pode acarretar erros significativos tanto nos resultados de vazão esperada, como no projeto dos sistemas de compressão (ou bombeamento), assim como de controle e segurança. No caso do CO₂, a variação da viscosidade do fluido líquido é muito pequena independente da pressão e temperatura. Entretanto, as variações de densidade são altamente influenciáveis por esses fatores, como visto anteriormente.

A Tabela 13 apresenta os resultados comparativos de vazão mássica encontradas nas simulações. Como as pressões de envio e recebimento neste caso estão fixas, as diferenças são causadas pela temperatura ambiente simulada.

Como se pode notar pela Tabela 13, no caso do CO₂ compressível, a vazão significativamente diferente comparado com os resultados do CO₂ incompressível. Ao aumentar a temperatura, a vazão mássica esperada é reduzida. Isto também tende a validar os resultados esperado no caso do fluido supercrítico que, no ponto crítico, possui em torno de metade da densidade do CO₂ líquido a mesma pressão e menores temperaturas.

Tabela 13 - Comparação entre CO₂ Compressível e Incompressível

Temperatura Ambiente [°C]	CO ₂ Compressível		CO ₂ Incompressível		Diferença de Vazão [ton/d]
	Massa Específica nas condições de Custódia [kgf/cm ²]	Vazão Mássica [ton/d]	Massa Específica nas condições de Custódia [kgf/cm ²]	Vazão Mássica [ton/d]	
20	831,49	1844	884,00	1882	38
25		1800		1882	82
30		1746		1882	136

A Figura 52 mostra a variação da velocidade do escoamento ao longo do duto. A velocidade no trecho de 10 polegadas tende a ser a mesma para todos os casos estudados, e praticamente constantes. Entretanto, no trecho de 6 polegadas, a variação da velocidade ao longo do duto no caso do CO₂ compressível se torna mais significativa, se diferenciando dos resultados obtidos para o CO₂ incompressível.

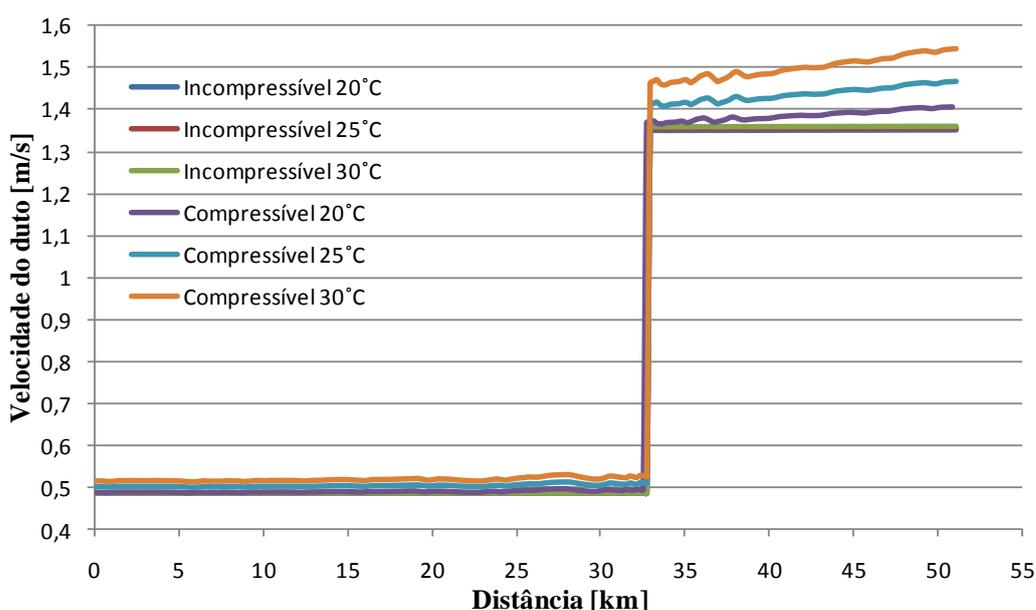


Figura 52 - Variação da Velocidade do escoamento do duto

Este efeito é bem mais notável na Figura 53, onde podemos perceber que, apesar das pressões de envio e recebimento serem as mesmas, e o perfil de pressão não sofrer grandes variações (Figura 54), o *Head* necessário para atender cada caso varia bastante quando se está lidando com o CO₂ compressível, tendo um desvio de quase 15% sobre os valores de CO₂ incompressível. Como o sistema de deslocamento de dutos trabalha com *Head* e não com pressão, um erro no projeto pode levar a uma necessidade de novos cálculos dispendiosos.

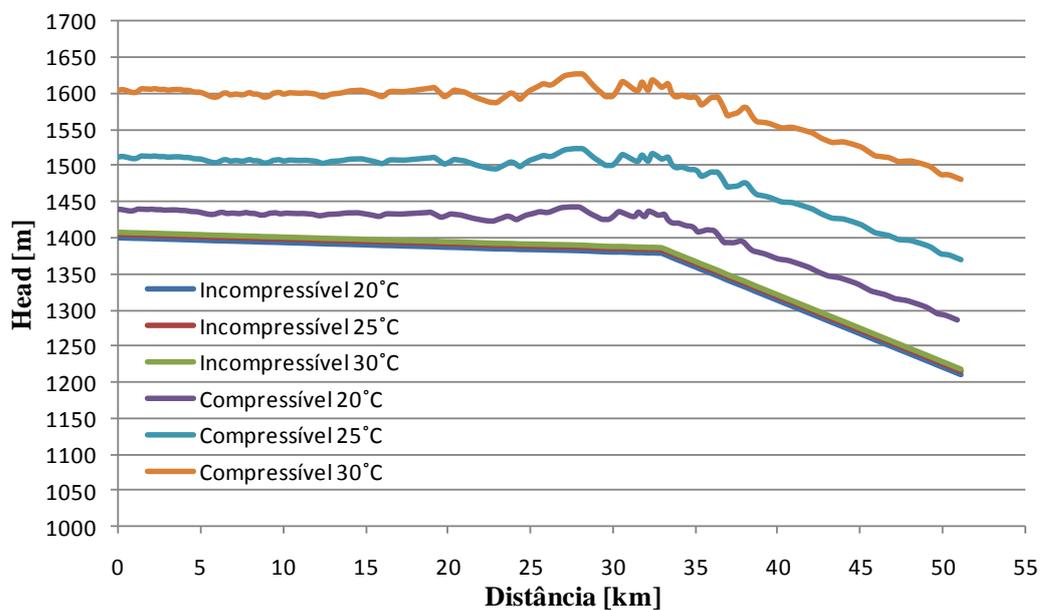


Figura 53 - Variação de Head no duto

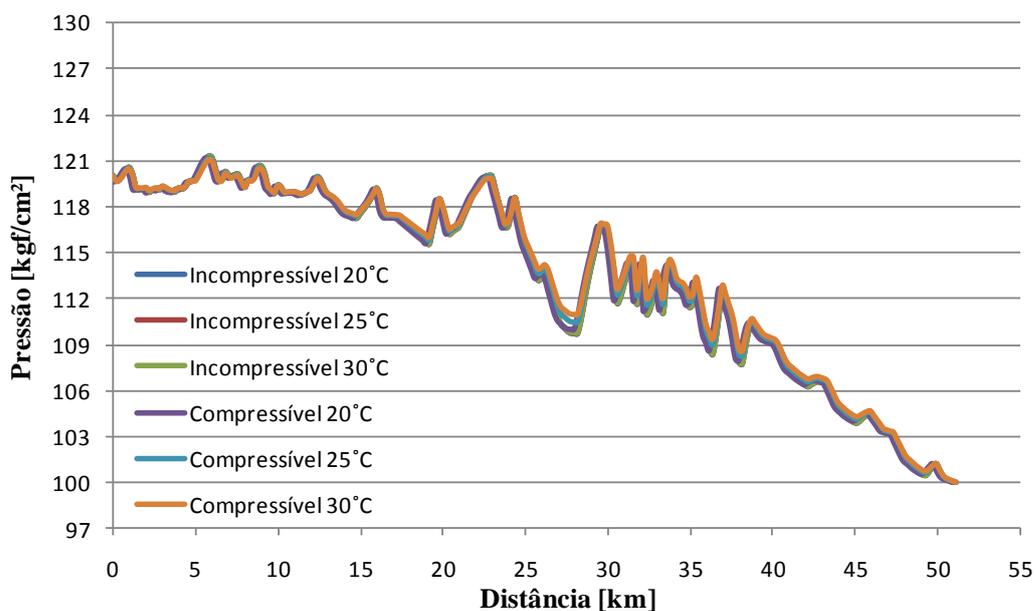


Figura 54 - Variação de Pressão no duto