

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

FELIPE GABRIEL MENDES

PIETRA CRISTINE WESTPHAL VELOSO

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DO PROCESSO DIRETO DE
HIP PARA MANUFATURA DE UM BLOCO DE VÁLVULAS**

CURITIBA

2022

FELIPE GABRIEL MENDES
PIETRA CRISTINE WESTPHAL VELOSO

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DO PROCESSO DIRETO DE
HIP PARA MANUFATURA DE UM BLOCO DE VÁLVULAS**

**Feasibility study of implementation of the direct hip process for manufacturing
a valve block**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Dr. Fabio Martins
Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Lupinacci Villanova

CURITIBA
2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

FELIPE GABRIEL MENDES
PIETRA CRISTINE WESTPHAL VELOSO

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DO PROCESSO DIRETO DE
HIP PARA MANUFATURA DE UM BLOCO DE VÁLVULAS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 23/junho/2022

Fábio Martins
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Maro Rogér Guérios
Especialização em Administração de Empresas
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcelo Maldaner
Mestrado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA
2022

AGRADECIMENTOS

Aos professores Fábio Martins e Rodrigo Villanova da UTFPR pelas orientações, conselhos e dedicação durante todo o desenvolvimento do presente trabalho. Aos Engenheiros Mecânicos Assiel e Fernanda Pieri por todas as horas de trabalho e aplicação realizadas de forma totalmente voluntária e dedicada para que os objetivos do trabalho pudessem ser atingidos, por todas as sessões de mentoria concedidas e todo o conhecimento compartilhado. Aos Engenheiros Paulo Chiquito e Ricardo Lucianetti pela coorientação. À Aker Solutions por ter disponibilizado os meios e a estrutura para a realização do trabalho. Aos colegas Rubens Frescha e Márcio Costa, pelas colaborações com cotação de processos internos. Aos pais, que contribuíram todos os dias para que pudéssemos ter a estrutura necessária para realização do trabalho. Aos amigos, por entenderem as ausências e continuarem ao nosso lado. E por fim, aos nossos companheiros que nos apoiaram e incentivaram durante todo o tempo.

RESUMO

Nos últimos anos a indústria de óleo e gás vêm sofrendo um movimento de modernização, no qual novos processos de manufatura estão sendo desenvolvidos constantemente. Este crescente investimento em novas tecnologias torna o mercado cada vez mais competitivo, obrigando as empresas do setor de petróleo e gás a estarem sempre em busca de otimizar seus processos. O presente trabalho teve o objetivo de estudar a possibilidade da aplicação do processo de HIP para fabricação dos blocos de válvulas dos *Pipeline End Manifolds*, em detrimento do processo de forjamento utilizado atualmente. Para o desenvolvimento do estudo foi realizada uma colaboração com a empresa Aker Solutions do Brasil Ltda., beneficiária dos resultados obtidos. Primeiramente foram levantadas as referências teóricas ligadas ao assunto, em seguida se deu o desenvolvimento de um modelo 3D focado no processo HIP, seguido pela cotação dos modelos juntamente com fornecedores, e posterior análise dos dados e comparação dos resultados obtidos para ambos os métodos de fabricação. Realizou-se também o estudo de integridade de bloco por meio de *software* de cálculo. Por fim, com todos os dados coletados, foi possível concluir que o processo HIP, em substituição ao forjamento e usinagem, não é economicamente nem tecnicamente viável para o caso em estudo. O estudo de cálculo de integridade do bloco apresentou resultados de deformação logarítmica superiores a 2%, e o melhor valor cotado para o fornecimento da peça em HIP culminou em um produto final 11% mais caro do que o bloco proveniente do forjamento.

Palavras-chave: HIP; manufatura; forjamento; usinagem.

ABSTRACT

In recent years, the oil and gas industry has been undergoing a modernization movement, in which new manufacturing processes are constantly being developed. This growing investment in new technologies makes the market increasingly competitive, forcing companies in the oil and gas sector to always be looking to optimize their processes. The present work aimed to study the possibility of applying the HIP process to manufacture valve blocks of a Pipeline End Manifolds, to the detriment of the forging process currently used. For the development of the study, a collaboration was carried out with the company Aker Solutions do Brasil Ltda., beneficiary of the results obtained. First, the theoretical references related to the subject were raised, then a 3D model was developed, focused on the HIP process, followed by the quotation of the models together with suppliers, further data analysis and comparison of the results obtained for both manufacturing methods with the study of calculation. A block integrity study was also carried out using calculation software. So, with all the data collected, it was possible to conclude that the HIP process, replacing forging and machining, is not technically and economically viable. The block integrity calculation study showed logarithmic deformation results greater than 2%, and the best quoted value for the supply of the part in HIP culminated in a final product 11% more expensive than the block from the forging.

Keywords: HIP; manufacturing; forging; machining

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: PLEM (<i>Pipeline End Manifold</i>).....	17
Figura 2: Bloco de válvulas PLEM.	18
Figura 3: Comparativo entre forjamento de matriz aberta e fechada.	19
Figura 4: Flange com junta para anel.	21
Figura 5: Esquemático processo de metalurgia do pó.	22
Figura 6: Comparativo de densidade nominal a partir de diferentes processos de metalurgia do pó do aço AISI 4640.	26
Figura 7: Comparação de porosidade de uma peça antes e depois do HIP.	27
Figura 8: Resultados de teste de tração.....	28
Figura 9: Etapas do estudo de caso.	29
Figura 10: Demonstração esquemática do comportamento da cápsula no processo de HIP.	32
Figura 11: Curva tensão x deformação do Super Duplex após o processo de HIP, conforme ASME VIII 2007.	36
Figura 12: Cenários de aplicação de pressão.....	37
Figura 13: Condições de contorno.	38
Figura 14: Modelo 3D do bloco de HIP.	41
Figura 15: Bloco forjado em estágio final (já usinado).	41
Figura 16: Apresenta a geometria interna do bloco forjado no estágio de cladeamento.	42
Figura 17: Apresenta a geometria interna do bloco forjado no estágio de pré-clad.	42
Figura 18: Fluxograma de processos internos a serem executados após cada um dos métodos de fabricação.....	45
Figura 19: Campo de tensão de Von Mises (interno), pressão de trabalho.	46
Figura 20: Campo de tensão de Von Mises (Externo), pressão de trabalho. ...	46
Figura 21: Campo de tensão de Von Mises (Interno), pressão de teste.	47
Figura 22: Campo de tensão de Von Mises (Externo), pressão de teste.....	47
Figura 23: Deformação logarítmica máxima, pressão de trabalho.	48
Figura 24: Deformação logarítmica máxima, pressão de teste.	48
Figura 25: Deformação da cavidade da válvula na direção Y, pressão de trabalho.	49
Figura 26: Deformação da cavidade da válvula na direção Y, pressão de teste.	49
Figura 27: Campo de tensão de Von Mises (Interno), pressão de trabalho.	50
Figura 28: Campo de tensão de Von Mises (Externo), pressão de trabalho. ...	50
Figura 29: Campo de tensão de Von Mises (Interno), pressão de teste.	51
Figura 30: Campo de tensão de Von Mises (Externo), pressão de teste.....	51
Figura 31: Deformação do bloco, pressão de trabalho.....	52
Figura 32: Deformação logarítmica máxima, pressão de trabalho.	52
Figura 33: Deformação da cavidade da válvula na direção Y (Interno), pressão de trabalho.	53
Figura 34: Deformação da cavidade da válvula na direção Y (Interno), pressão de teste.....	53
Figura 35: Sugestão de geometria otimizada para o bloco.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fator de contração forjamento a quente.....	19
Tabela 2: Fatores de carregamento.	35
Tabela 3: Propriedades mínimas do Super Duplex UNS S32505 proveniente do HIP - ASTM A988	35
Tabela 4: Dados de entrada da curva tensão x deformação do material a serem inseridos no programa Abaqus.	36
Tabela 5: Dados de cotação dos fornecedores.	43
Tabela 6: Resumo dos resultados.	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFC - Cúbica de Face Centrada

HIP - Hot isostatic pressing

MCV - Módulo de Conexão Vertical

MVB - Master Valve Block

PLEM - Pipeline End Manifold

FPSO - Sistema flutuante de produção armazenamento e descarregamento

URC - Uniform Rapid Cooling

URQ - Uniform Rapid Quenching

CISRI - China Iron & Steel Research Institute Group

ROV - Remotely Operated Vehicle

CRA - Corrosion Resistant Alloy

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1	Caracterização da oportunidade	13
1.2	Objetivos	14
1.3	Justificativa	14
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	PLEM – Pipeline End Manifold	16
2.2	Forjamento	18
2.3	Uniões flangeadas	20
2.4	Metalurgia do pó	21
2.5	Sinterização	22
2.5.1	Métodos de sinterização	23
2.6	HIP (<i>Hot Isostatic Pressing</i>)	24
2.6.1	HIP e a Metalurgia do pó	26
3.	METODOLOGIA	29
3.1	Descrição das etapas da metodologia	29
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1	Descrição das Atividades:	31
4.1.1	Modelagem 3D e desenhos de fabricação:	31
4.1.2	Cotação juntamente a fornecedores Aker Solutions:	31
4.1.3	Análise de integridade estrutural do bloco:	34
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5.1	Modelagem e desenhos de fabricação	41
5.2	Resultados de cotação	43
5.3	Resultados do cálculo de integridade do bloco	45
5.3.1	Cenário 1: Pressurização de apenas um dos bores.	45
5.3.1.1	Resultados de Tensão de Von Misses	45
5.3.1.2	Resultados de deformação	47
5.3.2	Cenário 2: Pressurização de ambos os bores.	49
5.3.2.1	Resultados de Tensão de Von Misses	49
5.3.2.2	Resultados de deformação logarítmica	51
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	56
6.1	Otimização da geometria do bloco	56

6.2	Outro objeto de estudo	56
6.3	Estudo de nacionalização da tecnologia.....	57
6.4	Estudo comparativo entre complexidade e viabilidade	57
6.5	Estudo sobre a tecnologia HIP juntamente com a manufatura aditiva	57
7.	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS.....	60

1. INTRODUÇÃO

O petróleo tem participação no desenvolvimento da sociedade desde os tempos mais remotos. Em todos os continentes do planeta há indícios de petróleo sendo retirado de jazidas naturais. Os povos babilônicos o utilizavam nas suas construções, os egípcios o usavam para pavimentar estradas, e os índios da América Latina decoravam e impermeabilizavam suas obras de cerâmica com o petróleo. A sociedade moderna começou a explorar petróleo de forma comercial por volta de 1859, quando Cel. Drake descobriu um poço de aproximadamente 21 metros de profundidade no estado da Pensilvânia, Estados Unidos, que produzia cerca de 2m³ de óleo por dia. Pouco tempo depois, descobriu-se que os produtos obtidos pela destilação do petróleo poderiam substituir o uso do óleo de baleia e querosene de carvão, utilizados na época como combustíveis para iluminação. Os Estados Unidos da América se mantiveram como os maiores produtores de petróleo do mundo até o final da Segunda Guerra Mundial, quando outros mercados começaram a despontar (THOMAS, 2004).

No Brasil, a exploração do potencial petrolífero apenas começou a se desenvolver efetivamente no ano de 1939, quando o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) encontrou com sucesso o seu primeiro poço (THOMAS, 2004). Em 1953, o governo Vargas instituiu o monopólio estatal do petróleo através da Petrobras. Contudo, no final dos anos 90, temendo que a estatal não pudesse suprir as necessidades do mercado e alegando que a empresa precisava de mais flexibilidade nas contratações, o então presidente, Fernando Henrique Cardoso, aprovou a chamada Lei do Petróleo, que permitia que a Petrobras contratasse empresas privadas para realizar as atividades de pesquisa, lavra e refino do óleo, mantendo, assim, um monopólio de escolha do Poder Público, iniciando o processo de abertura do mercado de óleo e gás nacional para a introdução de empresas privadas (GALA, 2020).

As mudanças climáticas, aliadas ao alto nível de poluição do ar, vêm impulsionando a necessidade por uma troca na matriz energética mundial, pois o consumo de petróleo e gás é um dos principais fatores responsáveis por esses problemas (OLIVEIRA, Nicole). No entanto, como o Mestre em Planejamento Energético Adriano Pires bem coloca em sua coluna do Blog Poder 360, as transições energéticas não são processos simples e não acontecem de forma instantânea e, na

visão do especialista, não é realista pensarmos em substituir completamente os combustíveis fósseis nos próximos 30 anos, já que as últimas transições do gênero, como a da madeira para o carvão, levaram mais de dois séculos para se completar (PIRES, 2020). Outro ponto importante a ser levado em consideração é a não utilização do petróleo apenas para a produção de energia, mas também como matéria prima para a maioria dos itens do cotidiano moderno, como roupas, medicamentos, produtos de higiene e até mesmo fertilizantes (PETROBRAS, 2014).

No ano de 2020 foram consumidos 88,5 milhões de barris de petróleo por dia no mundo, 2,3 milhões apenas no Brasil. Já o consumo mundial de gás natural no mesmo ano foi de 3,8 trilhões de metros cúbicos, sendo que 32,1 bilhões foram consumidos apenas no Brasil (ANP, 2021). Tendo em mente que o mundo ainda deve depender deste produto, toda a possibilidade de melhorar o processo de extração do mesmo, tornando-o mais otimizado e com menores emissões de carbono na sua cadeia produtiva, deve ser considerada e desenvolvida.

1.1 Caracterização da oportunidade

Visando a grande demanda mundial pela produção de petróleo da forma mais otimizada possível, este trabalho tem o objetivo de analisar uma oportunidade de melhoria no processo de fabricação dos blocos de válvulas do equipamento denominado PLEM (*Pipeline End Manifold*) produzido pela Aker Solutions. Hoje, este bloco é fabricado pelo processo de forjamento, mas nos últimos anos têm surgido no mercado exterior, principalmente na Noruega, alguns processos que podem ser mais vantajosos para a produção de equipamentos como este e, entre eles, o processo de HIP.

O PLEM possui a função de distribuir fluidos de injeção em sistemas de produção submarinos de petróleo e gás e é constituído por uma fundação com a função de suportar a sua carcaça estrutural, onde ficam instalados os MCVs (Módulos de Conexão Vertical) que, por sua vez, são conectados ao equipamento por linhas de fluxo rígidas. Essas linhas são interligadas por um bloco de válvulas para controle e direcionamento do fluxo de injeção. O bloco de válvulas do PLEM, que aloja as suas válvulas do tipo gaveta, consiste em uma grande peça de aço baixa liga, com as suas áreas molhadas, ou seja, que entrarão em contato com o fluido de injeção, revestidas pelo processo de CLAD com inconel 625 (AKER, 2021). Este revestimento é utilizado

por conta das propriedades de alta resistência à corrosão e elevada tenacidade do inonel (LIPPOLD, 2011).

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral estudar a viabilidade técnica e econômica do processo HIP de maneira a propô-lo como alternativa na concepção, projeto, dimensionamento e fabricação do bloco de válvulas do PLEM, visando a redução de custo, tempo de fabricação, peso, número de etapas de fabricação e otimização do modelo, além do aumento da vida útil e desempenho dos produtos. Para tanto, será realizado um estudo de caso do bloco de válvulas do equipamento PLEM da empresa Aker Solutions.

Como meio para atingir o objetivo final, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Compreender em profundidade o processo de HIP, bem como o forjamento.
- Comparar os pontos positivos e negativos de ambos os processos.
- Desenvolver uma proposta de design para o bloco, concebida dentro dos parâmetros do HIP.
- Orçar este modelo otimizado com fornecedores Aker Solutions.
- Comparar os aspectos econômicos e logísticos da utilização de cada um dos processos.
- Definir a viabilidade técnica através de estudos em modelos matemáticos e através de dados coletados com fornecedores.

1.3 Justificativa

O processo de forjamento que atualmente é utilizado para a fabricação dos blocos de válvulas limita o desenvolvimento da sua geometria, e dessa forma o equipamento acaba por ter um peso e dimensões elevadas, assim como tempo de entrega extenso devido aos numerosos processos de usinagem que precisam ser realizados para gerar equipamentos de baixa complexidade, é necessário não só trabalhar a sua geometria externa, mas também realizar toda a perfuração dos canais internos (AKER, 2021). Além disso, as camadas de inonel que precisam ser aplicadas nas linhas internas do bloco tornam-se mais espessas do que o necessário, por conta das limitações de geometria, resultando em elevação do custo de

fabricação. Portanto, a introdução de um processo de manufatura que ofereça alternativas viáveis e diminua esses problemas citados anteriormente é de grande interesse para a indústria de óleo e gás.

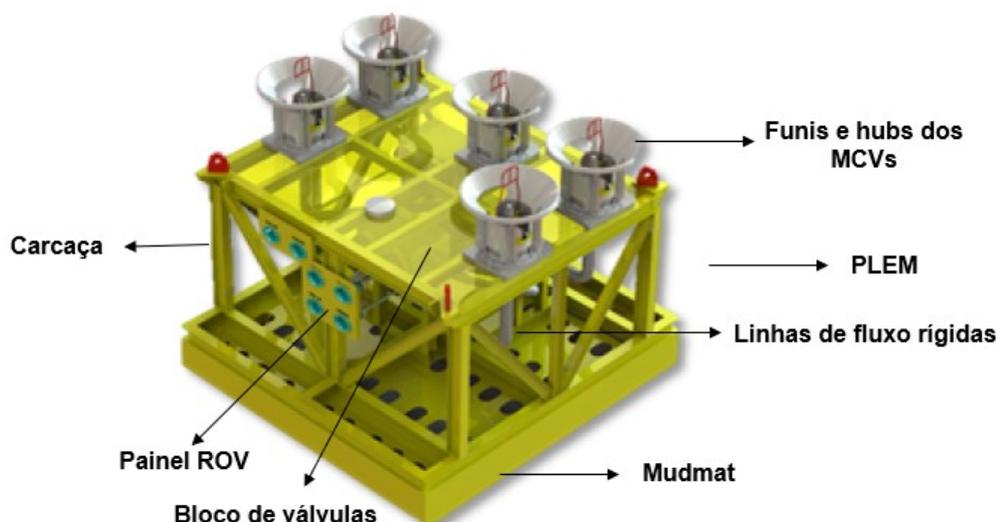
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PLEM – Pipeline End Manifold

O PLEM (*Pipeline End Manifold* - Manifold de fim de duto) é um equipamento utilizado em sistemas submarinos de produção de petróleo e gás cujo objetivo principal é dividir ou unir os fluxos de produção e injeção (PACHECO, 2020). Usualmente, o PLEM é instalado no final das linhas de fluxo para conectar dutos rígidos com as demais estruturas submarinas, como árvores e manifolds. Os manifolds comuns podem ser substituídos pelo PLEM quando existem poucos poços com requisitos de produção simples. Uma das principais vantagens da utilização dos PLEMs é a redução do número de tubulações, linhas de fluxo e risers nos sistemas de prospecção submarinos, uma vez que vários poços podem ter os seus fluxos unificados ou ramificados neste equipamento e, assim, não precisam estar conectados por linhas de fluxo exclusivas que iriam até a plataforma ou até o FPSO (Sistema flutuante de produção, armazenamento e descarregamento). Sem a existência do PLEM, por exemplo, para injetar água em quatro poços submarinos seriam necessárias quatro linhas de injeção vindo do FPSO, enquanto que com o PLEM podemos ter apenas uma linha de água que chega até o equipamento e é dividida em quatro saídas para atuação nos seus respectivos poços. Essas configurações diminuem não apenas os custos devido à redução do número de linhas de fluxo, mas também os riscos envolvidos no processo de prospecção submarina de óleo e gás (WANG et al., 2014).

Os principais componentes do PLEM Aker Solutions são: a sua carcaça estrutural, onde estão localizados os funis e hubs dos MCVs; a sua fundação (*mudmat*) que suporta a carcaça; as linhas de fluxo rígidas; o bloco de válvulas e o painel de controle ROV (Remotely Operated Vehicle – Veículo Operado Remotamente). Uma representação simplificada do PLEM Aker Solutions pode ser encontrada na figura 1 abaixo. Para o desenvolvimento do presente trabalho, o item mais importante do equipamento é o bloco de válvulas, que será melhor abordado a seguir (AKER, 2021).

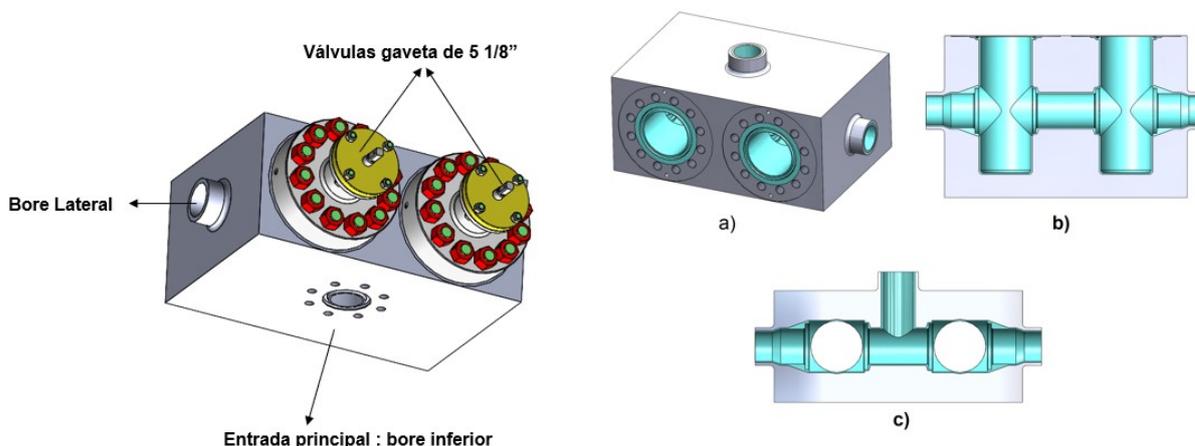
Figura 1: PLEM (Pipeline End Manifold)



Fonte: AKER, 2021.

O bloco de válvulas em estudo pesa cerca de 1.500 Kg e é fabricado em aço baixa liga, com aplicação de CLAD (solda de com inonel 625) nas suas superfícies molhadas, aquelas que entram em contato com o fluido de injeção. Na figura 2 encontra-se de forma mais detalhada os principais itens do bloco, que consistem em: 3 cavidades conectadas por um canal em forma de T; entrada principal localizada na face inferior do bloco e outras duas nas laterais. O sistema possui duas válvulas mecânicas do tipo gaveta de 5 $\frac{1}{8}$ " que controlam as saídas laterais do fluxo. Essas válvulas são operadas via ROV através do painel localizado na parte frontal da estrutura do PLEM. As linhas de fluxo do equipamento são conectadas aos blocos de válvulas através de conexões flangeadas e são feitas de material CRA (*Corrosion Resistant Alloy*), como Aço Duplex ou Super Duplex. O critério de aceitação para a utilização desta peça foi a ASTM A988 (especificação padrão para flanges, conexões, válvulas e peças para serviço de alta temperatura de aço inoxidável prensados isostaticamente a quente) (AKER, 2021). O bloco está representado de forma simplificada na figura 2 abaixo:

Figura 2: Bloco de válvulas PLEM.

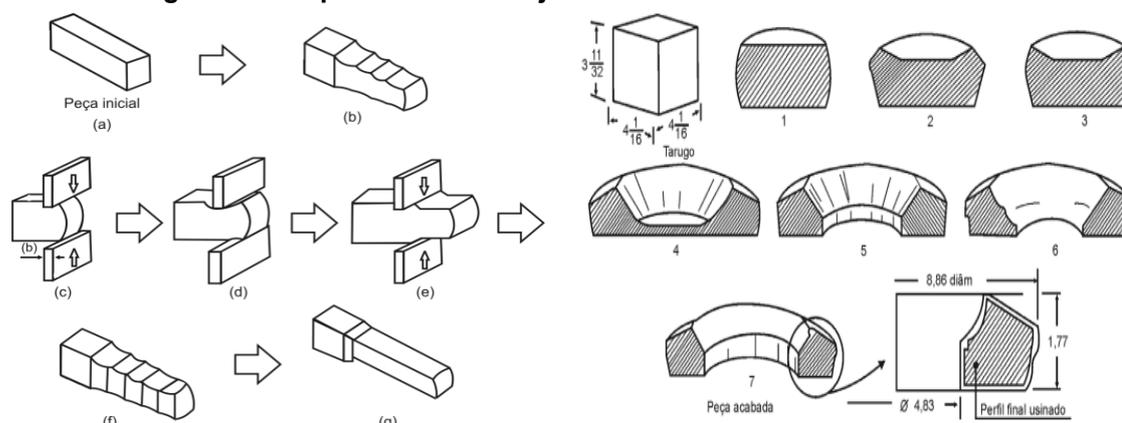


Fonte: AKER, 2021.

O bloco possui uma usinagem interna relativamente complexa para possibilitar o alojamento da válvula do tipo gaveta com os seus selos metálicos e elastoméricos, além das usinagens para acoplamento das conexões flangeadas, tanto para a conexão das linhas de fluxo, quanto para os atuadores das válvulas. A seguir serão desenvolvidos em maior profundidade alguns aspectos dos processos de usinagem e forjamento necessários para o melhor entendimento desse trabalho.

2.2 Forjamento

O forjamento é provavelmente o processo de conformação mecânica mais antigo da humanidade. Era praticado pelos ferreiros desde antes de Cristo para a produção de espadas e ferramentas. O processo consiste em deformar o metal, sendo ele aquecido previamente ou não, por martelagem ou prensagem. O forjamento pode ser classificado como em matriz aberta ou em matriz fechada. A matriz é a peça, geralmente de aço ferramenta, que entra em contato com o metal durante o forjamento. Quando o forjamento é em matriz aberta há pouca restrição à movimentação lateral do metal que está sendo comprimido, uma vez que neste processo as matrizes são planas ou com uma geometria simples, enquanto no forjamento em matriz fechada o metal adota a forma previamente esculpida nas duas partes da matriz, o que gera uma grande restrição ao espalhamento do material (HELMAN, 2015).

Figura 3: Comparativo entre forjamento de matriz aberta e fechada.

Fonte: HELMAN, 2015.

A maioria dos processos de forjamento são realizados acima da temperatura ambiente, e por isso é muito importante levarmos em consideração os efeitos de expansão e contração do metal, que dilata ao ser aquecido à temperatura de forjamento e resfriado após finalizado o processo. Por conta deste efeito de contração é necessário que a matriz seja produzida um pouco maior do que a peça final desejada. Caso contrário, o resultado será menor do que as dimensões projetadas (SOUZA, 2015). Para projetar essas matrizes utiliza-se um fator de contração. Podemos encontrar os valores deste fator para alguns metais na tabela 1:

Tabela 1: Fator de contração forjamento a quente.

Material	Contração
Aço	1 % (de 1020 a 20°C)
Cobre e bronze	0,8 % (de 520 a 20°C)
Latão	0,9 % (de 520 a 20°C)
Ligas leves	0,9 % (de 420 a 20°C)

Fonte: (SOUZA, 2015).

Além de conferir ao material a geometria desejada, o processo de forjamento ainda pode aprimorar as propriedades mecânicas do metal ao redistribuir os seus constituintes e refinar os seus grãos. As matérias primas para o forjamento geralmente são metais fundidos ou laminados, sendo que os laminados conferem uma estrutura mais homogênea para a peça final e por isso são os mais recomendados. Dentre os

metais que podem ser forjados estão os aços carbono, ferramenta e inoxidáveis, e as ligas de alumínio, cobre e titânio (BRESCIANI, 2011).

2.3 Uniões flangeadas

A indústria do petróleo faz uso constante de muitas uniões flangeadas para realizar a vedação entre componentes unidos. Estas uniões são basicamente formadas pelos flanges, anéis de vedação e elementos de fixação como parafusos, porcas e estojos. Conexões não soldadas, assim como os flanges, são um ponto crítico dos sistemas de transporte de produtos tóxicos ou poluentes, bem como químicos de injeção e petróleo. Por isso, é recomendável que se utilize o menor número possível de conexões flangeadas. Flanges são usualmente empregados para conexão entre válvulas e equipamentos, regiões que necessitem de fácil montagem e desmontagem. Também são usados para conectar tubulações de aço com revestimento anticorrosivo na parte interna aos tubos de ferro fundido (LEITE, 2020).

Vários tipos de flanges são utilizados na indústria de óleo e gás, como os flanges integrais, que são forjados ou fundidos em conjunto com o tubo; flanges sobrepostos, ligadas ao tubo através de duas soldas em ângulo, sendo uma interna e outra externa; flanges rosqueados, unidos ao tubo por meio de uma rosca e flange com face para junta de anel. Esse é o tipo de face que possibilita maior segurança para vedação, sendo utilizado para condições de altas pressões e temperaturas e no transporte de fluidos tóxicos, inflamáveis ou de potencial contaminação, como é o caso da indústria de prospecção de petróleo. A face para junta de anel possui um rasgo circular onde é encaixada a junta de vedação, que pode ser um anel metálico ou não metálico (LEITE, 2020). Uma representação dessa junta pode ser encontrada na figura 4 abaixo.

Figura 4: Flange com junta para anel.



Fonte: LEITE, 2020.

Esse tipo de flange garante ao sistema uma vedação melhor, de maneira sucinta, por dois motivos: por sua atuação da junta do anel sobre os rasgos dos flanges e por sua dilatação da junta do anel, ocasionada pela pressão interna no flange, que pressiona as paredes dos rasgos. As juntas dos flanges ficam submetidas a fortes pressões provenientes do aperto dos parafusos, além da pressão interna dos fluidos, que exerce força de cisalhamento da junta. Portanto, para permitir uma vedação eficiente, a pressão que é exercida pelos parafusos precisa ser superior à pressão interna exercida pelo fluido (LEITE, 2020).

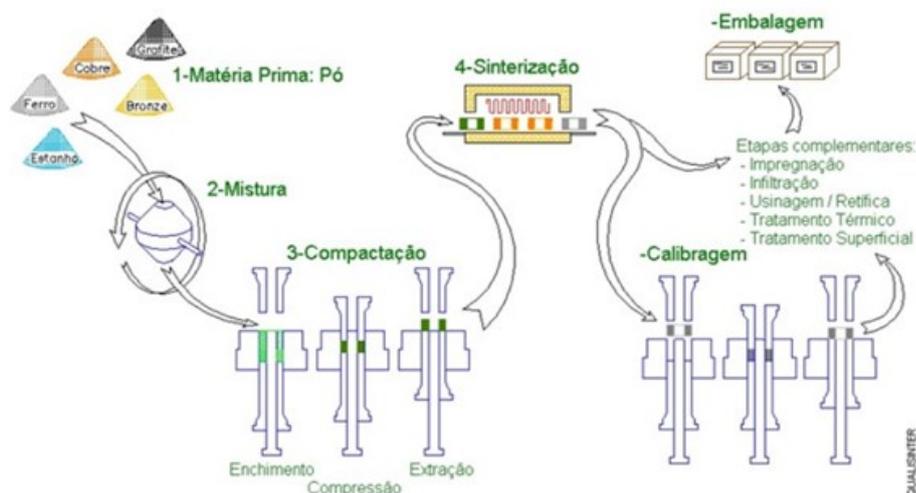
2.4 Metalurgia do pó

A metalurgia do pó é o processo de obtenção de peças através da pressurização de pó metálico, cerâmico ou compostos em matrizes. Essa técnica não garante nenhum tipo de resistência mecânica à peça produzida pois a pressão garante apenas as chamadas propriedades a verde (como a densidade e a resistência) com o produto já próximo da geometria final. A técnica que provê efetivamente as propriedades mecânicas após a etapa de compactação é a sinterização, processo físico e termicamente ativado que faz a união das partículas de pó do processo anterior. A sinterização garante as propriedades mecânicas ao material, pois elimina parcial ou completamente a porosidade.

O processo completo da metalurgia do pó garante um bom acabamento superficial, um alto controle de forma, dimensão, propriedades e composição química

do produto em que está sendo aplicado (BRITO; et.al, 2007). A figura 5 mostra um diagrama esquemático do processo de metalurgia do pó.

Figura 5: Esquemático processo de metalurgia do pó.



Fonte: BRITO; et.al, 2007

2.5 Sinterização

O que gera a sinterização é o transporte de material a fim de reduzir porosidade e atribuir as propriedades mecânicas desejadas através da redução da energia superficial livre das partículas em questão. Existem basicamente dois tipos de sinterização: por fase sólida e por fase líquida, sendo ambos capazes de garantir uma boa redução da porosidade da peça. Por fase líquida, a eliminação dos poros é obtida mais facilmente, enquanto por fase sólida é possível se ter um maior controle da porosidade do material (BRITO; et.al, 2007).

O que define o tipo de sinterização é a forma como os espaços vazios da peça são preenchidos através do deslocamento de material. Por fase sólida entende-se que não há elementos líquidos na estrutura e, conseqüentemente, por fase líquida, líquidos são formados na estrutura através de fusão de algum composto ou pela reação entre partículas do sistema (BRITO; et.al, 2007).

Há também a sinterização ativada. Nesse caso, a sinterização ocorre mais rapidamente devido à adição de elementos ativadores. Quando o aumento na velocidade de sinterização se dá apenas devido ao aumento de temperatura, podemos denominá-la como sinterização rápida (BRITO; et.al, 2007).

2.5.1 Métodos de sinterização

É possível obter a sinterização dos materiais através de vários métodos diferentes. Os mais usuais são: Sinterização em forno resistivo, sinterização reativa, sinterização por micro-ondas, sinterização seletiva por laser, sinterização por plasma e sinterização com auxílio de pressão (BRITO; MEDEIROS; LOURENÇO, 2007).

Como descrito por Brito, Medeiros e Lourenço (2007), a sinterização em forno resistivo, como o nome sugere, utiliza-se de um forno resistivo para atingir a sinterização. Essa técnica é a mais comum, tanto no âmbito industrial quanto no laboratorial, pois como atinge a sinterização apenas com o auxílio da temperatura, é o método mais simples e econômico, já que possibilita a fabricação de uma grande quantidade de amostras simultaneamente.

A sinterização reativa é uma técnica que abrange um nicho menor de materiais, já que ela depende da reação entre os componentes da amostra para se atingir a sinterização. Essa técnica pode ser feita em fornos resistivos e, de maneira geral, pode ser mais econômica, pois algumas reações deste método são exotérmicas, o que economiza na energia gasta pelo forno para se atingir a temperatura de sinterização (BRITO; MEDEIROS; LOURENÇO, 2007).

A sinterização por micro-ondas se diferencia das demais devido ao método de aquecimento da amostra. O aquecimento do material é feito de maneira uniforme devido à aplicação de ondas eletromagnéticas em faixa de micro-ondas e a interação das ondas com o material gera o aquecimento. A diferença dessa técnica para uma convencional técnica de aquecimento por indução é que a radiação afeta por completo o material, gerando um aquecimento homogêneo e evitando efeitos causados pelo gradiente térmico. Essa situação acarreta propriedades mecânicas mais homogêneas dos produtos finais e possibilita uma maior taxa de aquecimento, já que o mesmo é feito de forma muito mais rápida por abranger todo o material (BRITO; MEDEIROS; LOURENÇO, 2007).

A sinterização seletiva por laser é uma técnica utilizada na prototipagem rápida, na qual um feixe de laser é direcionado para sinterizar lugares específicos da amostra a fim de moldar um produto final através do aquecimento pontual da amostra. É um processo demorado pois se assemelha bastante à impressão 3D, a qual a fusão é

feita camada por camada possibilitando, assim, geometrias de complexidade ilimitada (SILVA; ALVES JÚNIOR, 1998).

A sinterização por plasma, por vez, consiste no aquecimento da amostra através de uma reação entre a atmosfera do reator e o potencial elétrico aplicado ao sistema. Assim como na sinterização por forno resistivo, o aquecimento da peça acontece a partir da superfície externa, para seu interior. Esta técnica pode gerar imperfeições no produto final devido à interação do material com o bombardeio de íons. (BRITO; MEDEIROS; LOURENÇO, 2007).

A sinterização com o auxílio de pressão combina os elementos de pressão e temperatura para intensificar o transporte de material durante o processo. Esse processo é utilizado para materiais de difícil sinterização, considerando apenas o uso da temperatura ou quando se deseja eliminar por completo a porosidade do produto final. Há dois principais métodos para se obter a sinterização com auxílio de pressão: a prensagem isostática a quente, mais conhecida como HIP (hot isostatic pressing) e a prensagem uniaxial a quente (BRITO; MEDEIROS; LOURENÇO, 2007).

2.6 HIP (*Hot Isostatic Pressing*)

De acordo com Eklund e Ahlfors (2017), a tecnologia HIP é conhecida há mais de 50 anos e é considerada, atualmente, como uma ferramenta padrão de produção para muitas aplicações. O processo aplica alta pressão (50-200 MPa) e alta temperatura (300-2500°C) na superfície externa do conteúdo presente na câmara através de um gás inerte, usualmente argônio ou nitrogênio. A combinação desses elementos resulta em reduzir a porosidade da peça devido à combinação de conformação mecânica, deformação plástica e difusão.

O surgimento da tecnologia HIP se deu por volta dos anos 50, quando pesquisadores procuravam desenvolver um método para revestir bastões combustíveis de óxido de urânio com Zircaloy para evitar a corrosão. O processo inicialmente foi batizado de ligação por pressão de gás. Com o avanço das pesquisas, foi constatado que esta técnica possibilitava a consolidação de materiais à sua densidade teórica, utilizando temperaturas abaixo das exigidas para prensagem a quente e da temperatura de sinterização, além de que também evita problemas

oriundos da segregação, comuns em peças produzidas a partir de forjados (MASHL, 2015, v. 7, p. 260).

Uma unidade comum de HIP consiste basicamente em um forno resistivo e um vaso de pressão resfriado a água. Seu funcionamento consiste na alocação do material dentro do vaso de pressão, onde o mesmo é vedado, evacuado e, logo em seguida, preenchido com um gás inerte. Em seguida, o sistema de aquecimento é ligado juntamente com o compressor até atingir os valores desejados de temperatura (Abaixo da temperatura de fusão, mas alta o suficiente para permitir difusão atômica) e pressão, que são mantidos por um certo tempo. Depois, são retirados do sistema para o resfriamento do material (MASHL, 2015, v. 7, p. 260).

Alguns exemplos de aplicação do processo de HIP são: para densificação de peças fundidas, tratamento térmico, sinterização de pó metálico, compactação de cerâmicos para aplicações médicas e odontológicas, otimização das propriedades de peças de manufatura aditiva, para solda entre metais, como ferramenta para o processo de metalurgia do pó, etc. (EKLUND; AHLFORS, 2017).

Atualmente, cerca de 50% de todas as unidades de HIP são para consolidação e tratamento térmico de peças fundidas. A gama de materiais que podem tirar proveito deste processo é elevadíssima, abrangendo materiais como alumínio, aços inoxidáveis, superligas, metais preciosos, cerâmicos, compósitos, etc. (EKLUND; AHLFORS, 2017).

As principais vantagens do sistema HIP são: eliminação da porosidade; possibilidade de designs mais complexos que reduzem a massa; aumento da vida em fadiga em até dez vezes, dependendo da liga; aumento da vida útil; homogeneização das propriedades do material; aumento da ductilidade e da tenacidade; promoção da solda por difusão entre metais similares ou não; redução do desperdício de material no processo produtivo e redução da necessidade de Testes Não Destrutivos (NDTs) (EKLUND; AHLFORS, 2017).

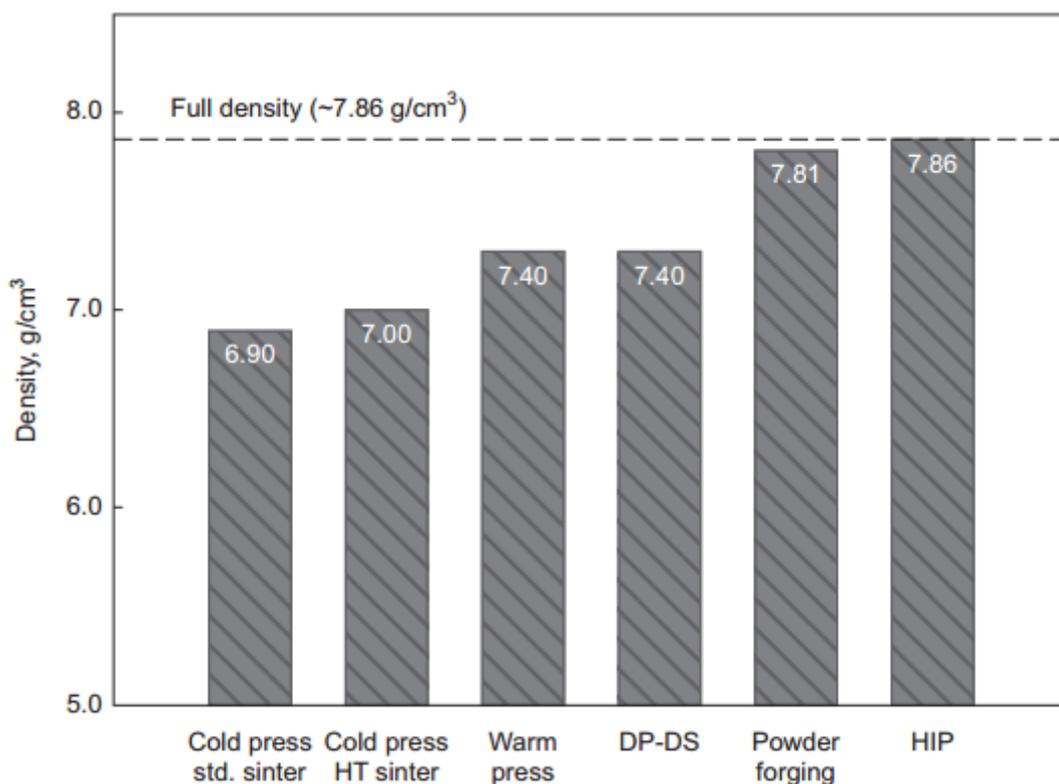
Atualmente as principais desvantagens do processo são: tempo do processo elevado, baixa capacidade produtiva e o alto custo. Entretanto, já há tecnologias que

podem amenizar estas desvantagens para aplicações específicas (DAYAL; TRIANI, 2017).

2.6.1 HIP e a Metalurgia do pó

Devido à capacidade de eliminar a porosidade do material, o processo HIP é capaz de resultar em peças com densidades extremamente próximas aos valores teóricos. A figura 6 mostra um comparativo de peças sinterizadas por alguns métodos diferentes e evidencia a capacidade da tecnologia HIP em produzir peças sem porosidade (MASHL, 2015, v. 7, p. 260).

Figura 6: Comparativo de densidade nominal a partir de diferentes processos de metalurgia do pó do aço AISI 4640.



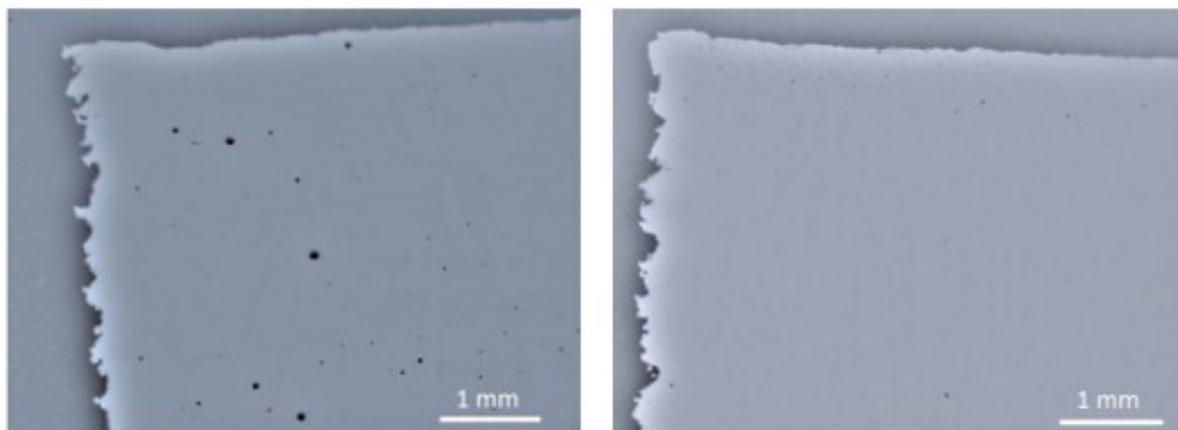
Fonte: MASHL, 2007

Atualmente, as tecnologias disponíveis no mercado que unem a tecnologia HIP com a metalurgia do pó são capazes de criar peças complexas, já no seu formato final ou em uma geometria muito próxima, minimizando a necessidade de pós-processamentos. Sendo assim, é uma alternativa para itens produzidos a partir de forjados (MASHL, 2015, v. 7, p. 260).

O principal método para obtenção de peças a partir da metalurgia do pó juntamente com o processo HIP consiste na encapsulação do pó em um molde de metal soldado (chapas finas de aço carbono ou aço inox) com auxílio de uma mesa vibratória para acomodação dos grãos, a fim de atingir a densidade batida do material particulado. Após isso, o material é colocado dentro da célula HIP, e então é retirado o ar da câmara. Após isso, é preenchido com o gás inerte para que o processo de aquecimento e pressurização comecem. Para esse processo acontecer, geralmente a granulometria preferível é de pós esféricos, pois estes preenchem de maneira mais eficiente o volume do molde. Os moldes para esse processo são descartáveis, já que, devido ao fenômeno de fluência que acontece durante a prensagem isostática a quente, o molde precisa ser usinado ou corroído para a extração da peça final (MASHL, 2015, v. 7, p. 260).

Ao final do processo, é possível se obter uma peça com densidade próxima à teórica, teor de porosidade próximo de zero, como evidenciado na figura 7, e propriedades mecânicas isotrópicas e uniformes ao longo de todo o material (MASHL, 2015, v. 7, p. 260).

Figura 7: Comparação de porosidade de uma peça antes e depois do HIP.



Fonte: AHLFORS et al (2017)

2.6.2 Comparativo entre uma peça Forjada e uma peça produzida a partir da metalurgia do pó e HIP

Shiokawa et al. (2017) realizou um estudo comparativo entre um bloco de válvula fabricado a partir de um forjado e um fabricado a partir de metalurgia do pó e

HIP, a partir do um pó metálico Grau 91 (Aço principalmente utilizado para aplicações em altas temperaturas).

O que foi observado neste estudo foram as dimensões, as propriedades e a microestrutura do bloco após o HIP e a diferença de peso e tempo de processo entre os blocos HIPados e forjados (SHIOKAWA et al., 2017).

Em questões de dimensão, o bloco não atingiu as dimensões de projeto após o HIP, isto ocorreu devido a ser um protótipo de teste, então o molde para o bloco não foi projetado exatamente para atingir as dimensões do projeto após o processo (SHIOKAWA et al., 2017).

Para o teste de tração foram coletadas 7 amostras em diferentes partes do bloco, denominadas por letras maiúsculas de “A” a “F”, e o resultado foi comparado com a norma ASTM A989. Os dados coletados foram: tensão de ruptura, força de tração, alongamento e redução de área. Os dados são evidenciados na figura 8. Em todos os testes, as amostras se mostraram mais resistentes que os valores da norma (SHIOKAWA et al., 2017).

Figura 8: Resultados de teste de tração.

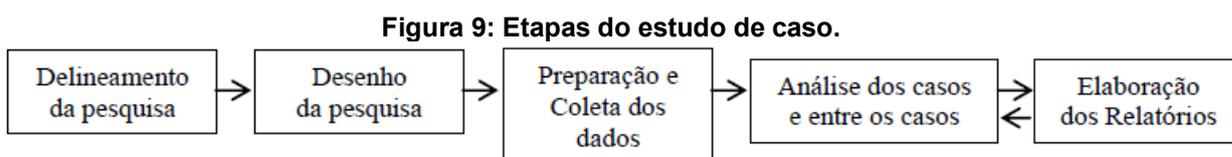
	A	B	C	D	E	F	Average	ASTM A 989
0.2% proof stress [MPa]	475.0	474.3	474.5	472.5	474.5	474.3	474.2	415
Tensile strength [MPa]	648.5	649.3	645.8	645.5	646.5	644.8	646.7	585
Elongation [%]	29.2	29.8	28.5	28.3	28.5	28.7	28.8	20
Reduction of area [%]	71.1	71.2	70.2	71.2	70.8	70.7	70.9	40

Fonte: SHIOKAWA et al., 2017

Na comparação das microestruturas, foi observado extrema homogeneidade ao longo de toda a espessura do bloco. Dessa forma, as propriedades mecânicas do material são praticamente as mesmas em qualquer ponto da peça. Nas diferenças de peso e tempo de processo, por vez, foi constatada uma redução de 40% no peso do bloco e uma redução de 30% no tempo de fabricação da peça (SHIOKAWA et al., 2017).

3. METODOLOGIA

Para a realização do presente trabalho realizou-se um estudo de caso do tipo exploratório, cujo objetivo principal é estudar a possibilidade do uso do processo de HIP para a fabricação do bloco de válvulas de um equipamento destinado a produção de petróleo, o PLEM. Este método denominado HIP é pouco difundido no Brasil, ou seja, se encaixa na definição de pesquisa exploratória, que busca compreender um fenômeno ou processo pouco explorado. Para pesquisas do tipo exploratórias, com frequência se utiliza o método de estudo de caso. Segundo Branski o método de pesquisa exploratória passa por cinco etapas: delineamento e desenho da pesquisa, preparação, análise de casos e entre casos, juntamente com a elaboração do relatório. Podemos encontrar na figura 9 abaixo um fluxograma esquemático com as respectivas fases (BRANSKI, 2010).



Fonte: BRANSKI, 2010.

3.1 Descrição das etapas da metodologia

A primeira etapa denominada delineamento da pesquisa se refere a determinação do tema a ser estudado, os objetivos e questões da pesquisa, e então a execução da revisão bibliográfica (BRANSKI, 2010). Para a execução do levantamento de bibliografia foram utilizados alguns portais de pesquisa, como o Google Acadêmico e o OpenPetro, além de algumas fontes de pesquisa informais como o próprio Google, catálogos de empresas metal mecânicas, e portais focados em engenharia mecânica e processos de fabricação. Os resultados desta etapa podem ser encontrados no capítulo 2.

Após finalizada a pesquisa bibliográfica, elaborou-se as proposições para direcionamento do estudo de caso, o que contribuiu na delimitação do escopo da pesquisa. As proposições levantadas em relação a substituição do método de fabricação para o presente estudo de caso são:

- 1- Redução do tempo de processamento
- 2- Redução de peso
- 3- Redução de volume

- 4- Aumento da complexidade da peça
- 5- Melhora nas propriedades mecânicas
- 6- Redução de custo

Com o objetivo de responder às proposições formuladas e descritas acima, realizou-se primeiramente uma preparação e logo após uma coleta de dados. A preparação constitui-se no desenvolvimento do design otimizado do produto, com modelagem em SolidWorks e cálculo estrutural desenvolvido no software Abaqus. Já o levantamento de dados baseou-se em um trabalho realizado em conjunto com a empresa Aker Solutions e os seus fornecedores para o levantamento de orçamentos, tempo de produção e entrega.

Após a coleta dos dados sobre ambos os processos analisados, forjamento e HIP, estes foram analisados e comparados, ao mesmo tempo em que se elaborou o relatório com os respectivos resultados, e respostas às proposições anteriormente levantadas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Softwares utilizados para análise:

- SolidWorks 2020®: Modelagem 3D e desenhos de fabricação
- Abaqus 2020®: Cálculo de análise de integridade estrutural do bloco a ser fabricado pelo processo de HIP.
- Excel: Cálculo da curva tensão-formação do material obtido pelo processo de HIP e demais cálculos analíticos.

4.1 Descrição das Atividades:

4.1.1 Modelagem 3D e desenhos de fabricação:

Primeiramente realizou-se a modelagem 3D do bloco a ser obtido pelo processo de HIP, utilizando como premissa a melhora das propriedades mecânicas que o processo fornece, o que teoricamente possibilitaria a redução da espessura das paredes do bloco.

Em seguida, foram realizados os desenhos de fabricação, para que assim, fosse viabilizado o envio do projeto ao fornecedor, com a finalidade de obtenção de cotação.

Os desenhos de fabricação foram elaborados levando em consideração todas as tolerâncias e informações necessárias para possibilitar a produção do bloco na geometria final necessária, mas, levando em consideração a existência de informações confidenciais, como dimensões específicas para montagem e funcionamento do bloco, os desenhos que compõem o presente trabalho são representações simplificadas.

4.1.2 Cotação juntamente a fornecedores Aker Solutions:

Para realização da estimativa dos custos de compra dos blocos provenientes de cada um dos processos de fabricação, quais sejam, HIP e forjamento, entrou-se em contato com dois fornecedores de cada um dos tipos de processo de fabricação. Todas as quatro empresas já haviam estabelecido relações comerciais com a Aker Solutions, e são nomes conhecidos no mercado de óleo e gás, empresas essas, que possuem grande credibilidade no mercado.

O processo de cotação seguiu o padrão formal da Aker Solutions, e ocorreu via e-mail enviado por um engenheiro mecânico profissional especializado em

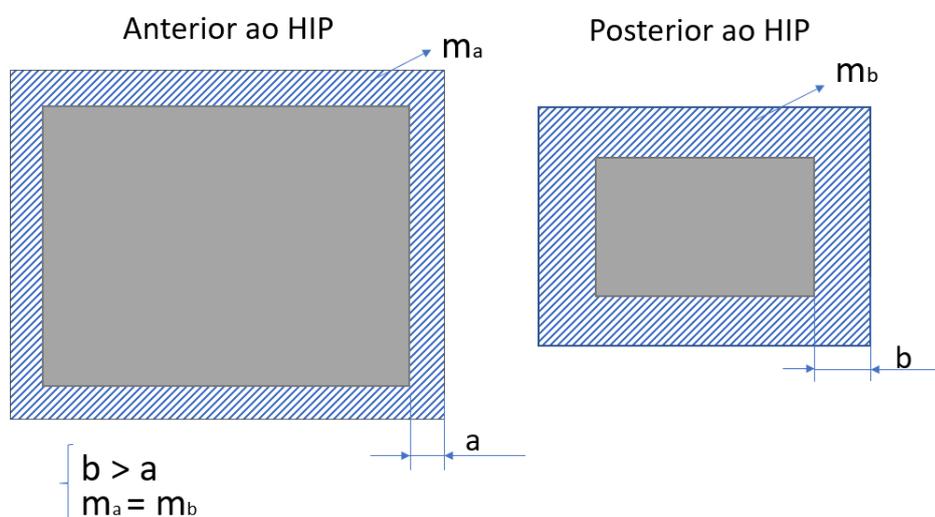
compras, que conforme citado nos agradecimentos, colaborou com o desenvolvimento deste trabalho fornecendo todo o apoio necessário para realização da cotação e comparação de custos.

Durante todas as etapas junto aos fornecedores, foi dada ciência a cada um deles sobre a finalidade acadêmica da cotação para o presente projeto, portanto, foram convidados a participar como colaboradores deste trabalho científico.

Para um melhor entendimento do processo e alinhamento de expectativas quanto aos resultados e métodos do HIP, foi realizada uma reunião com um dos fornecedores na Suécia, por videoconferência, no qual a empresa disponibilizou uma hora do tempo do seu gerente de produtos global para responder a todas as dúvidas e questionamentos do grupo e do professor orientador.

Nesta reunião foi possível esclarecer dúvidas quanto ao funcionamento da cápsula (molde) de HIP, como por exemplo o seu mecanismo de transmissão de esforço e de contração volumétrica, que ocorre principalmente devido à fluência mecânica do material da cápsula, resultado da aplicação de alta pressão sobre as suas finas paredes. A cápsula aumenta de espessura durante o processo de HIP devido ao mecanismo de fluência, e com isso o seu volume interno diminui, o que permite a transmissão de pressão ao pó contido dentro do molde. A figura 10 representa de forma esquemática este comportamento de aumento da espessura da cápsula, enquanto a sua massa permanece constante durante o processo.

Figura 10: Demonstração esquemática do comportamento da cápsula no processo de HIP.



Fonte: Os autores.

O primeiro fornecedor do processo de HIP, denominado como Fornecedor de HIP 1 (empresa de origem inglesa), apresentou uma cotação para o bloco a ser entregue imediatamente após o HIP, sem a operação final de usinagem. Portanto, o bloco ainda precisaria passar pelos processos de usinagem final e ajustagem final. Este fornecedor apresentou o valor cotado para a entrega de apenas uma peça e também o preço para a compra de 5 unidades do bloco.

O Fornecedor de HIP 2 (empresa de origem sueca) apresentou apenas a cotação para compra de 5 unidades da peça. No entanto, informou os valores para duas situações, uma do bloco em estado final, já com processo final de usinagem incluso, e outra para o bloco em estágio imediatamente após o HIP, portanto, sem o processo de usinagem final.

Os fornecedores de forjado, também denominados de Fornecedor de Forjado 1 e Fornecedor de Forjado 2, apresentaram cotação para cenário de compra de 5 unidades do bloco, ambos em estágio de pré-clad. Nesse enfoque, cabe aqui elucidar aspectos pertinentes a peça forjada, a qual, ao ser comprada no estágio de pré-clad ainda precisa passar por alguns processos de fabricação, que podem ocorrer internamente, ou serem terceirizados, sendo eles: pré-usinagem, ajustagem, clad, tratamento térmico, usinagem final, ajustagem final e revestimento.

Entretanto, o Fornecedor de Forjado 2 não fabrica peças em aço AISI 8630 por não possuir ferramentas adequadas para o processamento desse tipo de material, e realizou a cotação em aço A182 F22, o que não foi um empecilho, vez que este material também possui histórico de utilização para blocos de válvulas da indústria de óleo e gás, e inclusive já foi utilizado dentro da Aker Solutions, o ocorre que, por possuir propriedades semelhantes ao 8630 a um custo geralmente mais elevado, portanto, não é o material mais utilizado para essa aplicação dentro da empresa.

A cotação dos processos de fabricação internos foi realizada com a ajuda de um funcionário especializado em cotação de processos de manufatura da área de Tender da empresa. A área de Tender de uma empresa de óleo e gás é formada por uma equipe dedicada a pesquisa, desenvolvimento e planejamento de produto, a fim de disputar as licitações de projetos iniciadas pelos clientes. Foram estimadas as horas necessárias para realização de cada uma das operações, e utilizou-se uma taxa média de custo de operação da planta da Aker Solutions de São José dos Pinhais para estimar o custo total dos processos. Esta taxa média de custo por hora de

manufatura leva em consideração tanto os custos fixos como variáveis da planta, dado este, de extrema confidencialidade para a empresa, e por conta disso os valores apresentados nos resultados serão de comparação entre os custos do bloco partindo da peça forjada e do bloco partindo da peça de HIP.

4.1.3 Análise de integridade estrutural do bloco:

A análise estrutural do bloco foi realizada com o objetivo de verificar a sua integridade sob as solicitações mecânicas previstas tanto para operação em campo quanto para teste hidrostático. Ambas as condições são classificadas como atividades de alto risco devido a magnitude das pressões aplicadas.

A pressão de teste hidrostático usualmente utilizada para blocos de válvulas é de 1,5 vezes a pressão de operação, ou seja, para um bloco que irá operar a 68,95 MPa (10.000 *psi*) a pressão de teste é de 103,42 MPa (15.000 *psi*). Todo o trabalho de cálculo foi realizado em conjunto com uma profissional especializada na área e com larga experiência em análise de integridade estrutural de bloco de válvulas, profissional esta, que atuou como mentora do presente trabalho e foi devidamente citada nos agradecimentos.

As normas usualmente requeridas para equipamentos a serem utilizados na indústria de óleo e gás submarina são a API 6A e a API 17D, estas por sua vez permitem o uso de outras normas. Sendo assim, para a análise elasto-plástica do bloco de válvulas utilizaremos o critério de aceitação da norma ISO 13628-7, que define o limite máximo de deformação plástica para regiões que possam causar instabilidade estrutural como sendo igual ou inferior a 2%.

O cálculo do coeficiente de segurança (CS) a ser utilizado foi realizado através da equação da ISO 13628-7 a seguir:

$$CS = \frac{1}{S_d} \quad (1)$$

$$S_d = \frac{2}{3} \cdot C_f \cdot R_{UC} \quad (2)$$

Sendo:

S_d = força admissível

C_f = Fator de carregamento

R_{UC} = Capacidade última

Os valores de fator de carregamento foram utilizados conforme a ISO 13628-7 e podem ser encontrados na tabela 2:

Tabela 2: Fatores de carregamento.

Condição de Carregamento	C_f
Carga acidental	1,5
Teste hidrostático (FAT)	1,35
Operação temporária	1,2
Operação normal	1

Fonte: ISO 13628-7

Portanto considerando uma pressão de trabalho de 68,95 MPa (10.000 *psi*), obtém-se um CS de 1,5 para operação normal, e 1,25 para condição de teste. A avaliação de integridade do bloco foi realizada com a pressão de trabalho e a pressão de teste. Para a condição de trabalho a pressão nominal é de 68,95 MPa (10.000 *psi*), aplicando-se o fator de segurança de 1,5 a pressão de trabalho a ser aplicada no modelo é de 103,42 MPa (15.000 *psi*). A pressão de teste nominal é de 103,42 MPa (15.000 *psi*), aplicando-se o fator de segurança de 1,25 demonstrado anteriormente, o valor da pressão aplicada ao modelo é de 129,28 MPa (18.750 *psi*).

Um dos valores de entrada do *software* Abaqus para a análise elasto-plástica é a curva tensão x deformação do material, com o objetivo de permitir a reprodução do comportamento elástico e plástico da peça. Esta curva foi calculada em planilha Excel desenvolvida pela empresa Aker Solutions baseada na ASME VIII 2007, com os valores de entrada sendo o módulo de elasticidade, tensão de escoamento e tensão última do material.

O material utilizado para a simulação numérica é o Super Duplex UNS S32505 - 80K obtido a partir do processo de HIP, que pela norma ASTM A988 possui as seguintes propriedades mínimas:

Tabela 3: Propriedades mínimas do Super Duplex UNS S32505 proveniente do HIP - ASTM A988

Tensão de escoamento	550 MPa (80 ksi)
Tensão última de ruptura	800 MPa (116 ksi)

Fonte: ASTM A988.

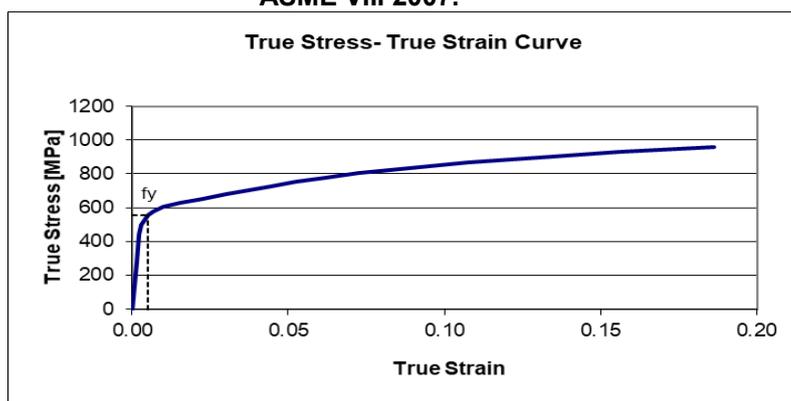
Os valores do coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade da liga foram obtidos na norma ASME II, com os valores de 0,31 para o módulo de Poisson e módulo de elasticidade igual a 200 GPa a 25°C.

Para densidade do material, utilizamos o valor da densidade teórica, uma vez que o processo de HIP, pela norma ASME A988, garante densificação total da peça, e o próprio fornecedor em seus documentos de propriedades do material apresenta

um valor de densidade igual 7.800 kg/m^2 para as peças produzidas a partir do HIP em Super Duplex.

A partir dos dados do material citados anteriormente foi possível construir a curva tensão x deformação conforme a ASME VIII 2007, esta curva é apresentada figura 11, e cujos dados de entrada estão apresentados na tabela 4.

Figura 11: Curva tensão x deformação do Super Duplex após o processo de HIP, conforme ASME VIII 2007.



Fonte: os autores.

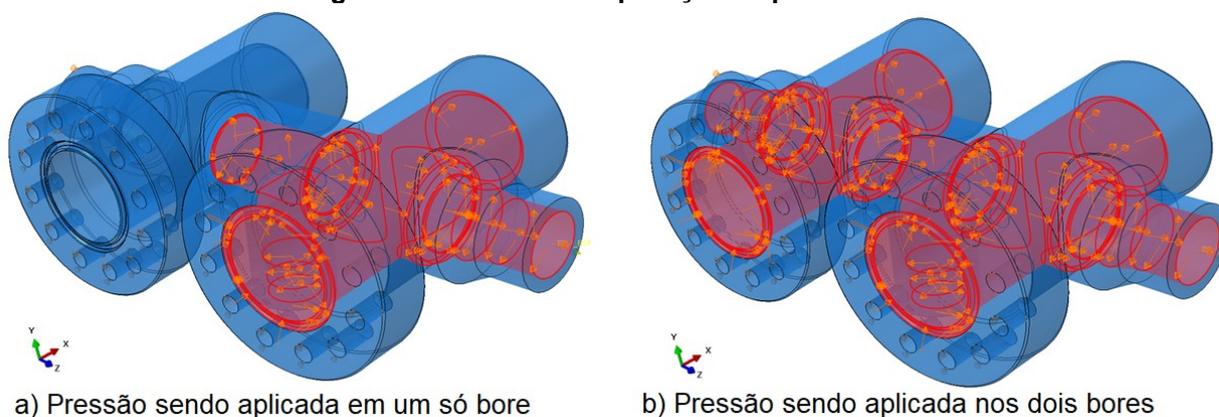
Tabela 4: Dados de entrada da curva tensão x deformação do material a serem inseridos no programa Abaqus.

Curva Tensão deformação		
Deformação real	Tensão real [MPa]	Deformação plástica real
0	0	0
0,001379	276	0,000000
0,002331	441	0,000125
0,003022	496	0,00054
0,004983	554	0,002212
0,006878	579	0,003983
0,010146	604	0,007126
0,015455	629	0,012311
0,022597	654	0,019329
0,030087	678	0,026695
0,037158	703	0,033642
0,044375	728	0,040734
0,052435	753	0,048671
0,06175	778	0,057861
0,07255	803	0,068538
0,088534	834	0,084365
0,107491	865	0,103165
0,129796	896	0,125314
0,155871	928	0,151233
0,186186	959	0,181392

Fonte: Os autores.

Foram avaliados dois cenários diferentes, o primeiro cenário representa o estado de pressurização em apenas um dos *bore*s do bloco, enquanto o segundo corresponde à situação em que ambos os *bore*s do bloco estão sob pressurização, a representação esquemática desses cenários pode ser verificada na figura 13, sendo a que a figura a) apresenta a pressão sendo aplicada em um só *bore*, e a figura b) representa a aplicação de pressão em ambos os bores:

Figura 12: Cenários de aplicação de pressão.



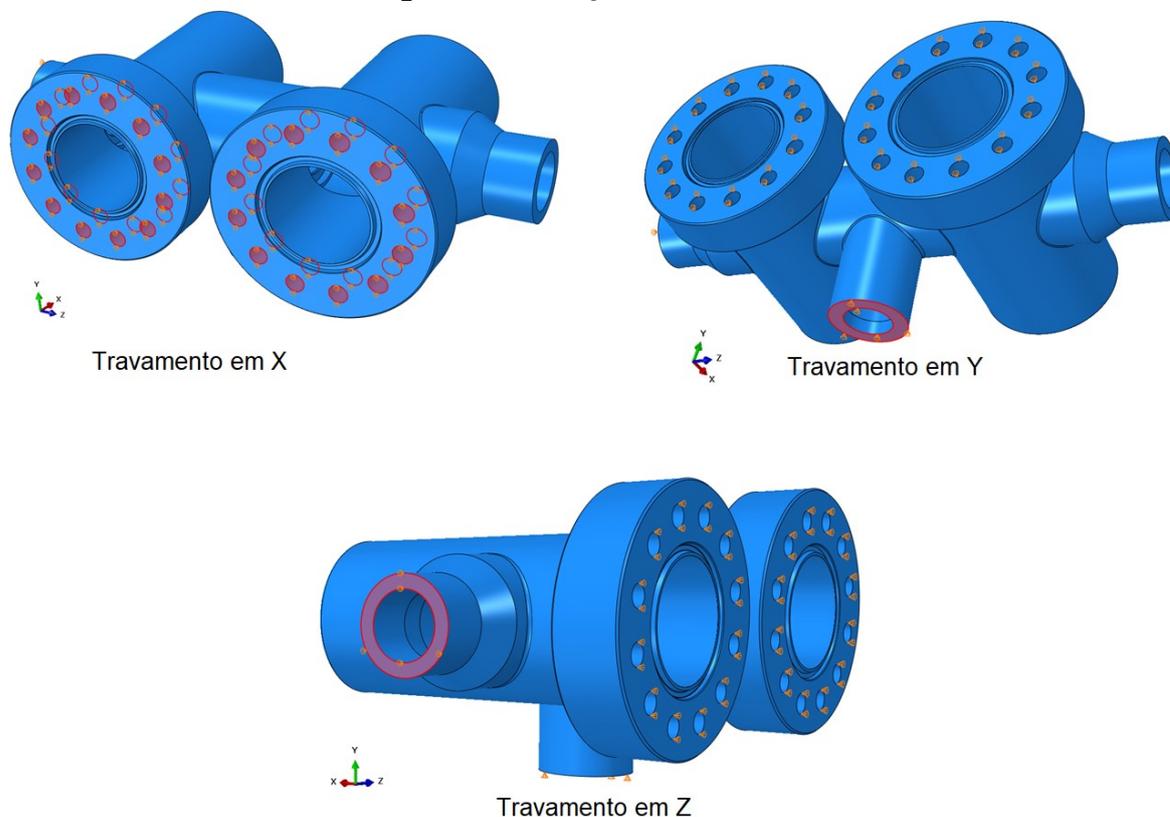
Fonte: Os autores.

Para a condição da aplicação da pressão em ambos os *bore*s utilizamos um segundo modelo no Abaqus para que os efeitos residuais da primeira condição não interferissem na segunda análise.

As condições de contorno de fixação do bloco foram estabelecidas na região dos flanges (direção *x*), da lateral esquerda (direção *z*) e do *bore* inferior soldado (direção *y*). Apenas a solda lateral esquerda foi fixada na direção *z* porque não era possível apenas com o modelo do bloco representar de forma efetiva o nível de rigidez do conjunto caso fossem consideradas as duas soldas laterais. O Abaqus entende que o bloco estaria totalmente rígido nessas regiões e dessa forma o cálculo de integridade é afetado, porém na situação real, a soldagem do bloco nos tubos gera bem menos rigidez devido aos graus de liberdade que essa montagem proporciona. Na lateral direita foi inserida uma ECF (*End Cap Force* - força de capa final) para representar a condição de “fixação” lateral e as forças de reação que serão geradas. Essa força foi calculada através da pressão aplicada no modelo, e a área da superfície interna do bloco. Os resultados desse cálculo serão apresentados na tabela 12 da

próxima seção. A figura 14 apresenta o modelo esquemático dessas condições de contorno citadas anteriormente.

Figura 13: Condições de contorno.



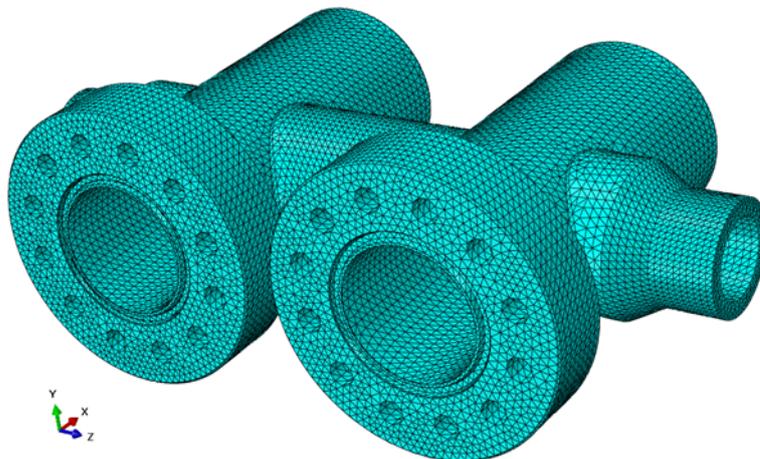
Fonte: Os Autores

A malha utilizada é composta por 250.037 elementos quadráticos tetraédricos do tipo C3D10 com tamanho global médio de 12mm, a figura 13 mostra a malha construída no programa Abaqus. Devido à geometria interna padrão de alojamento da válvula possuir chanfros bastante finos, o perfil da malha nessas regiões fica prejudicado, resultando em elementos alongados e pontiagudos. Para melhorar os resultados da análise e não permitir que essa distorção da malha prejudique o andamento do cálculo, realizou-se uma simplificação no modelo nessas regiões, retirando esses pequenos chanfros e os furos de içamento da superfície flangeada, como pode ser verificado na figura 14.

No caso do bloco forjado, a camada de inonel é desconsiderada na análise de integridade estrutural, e o modelo utilizado da peça é o referente a fase de pré-clad, portanto não se encontra esse tipo de dificuldade, mas uma vez que a peça em HIP não precisa de cladeamento interno, e é toda feita do mesmo material (Super Duplex)

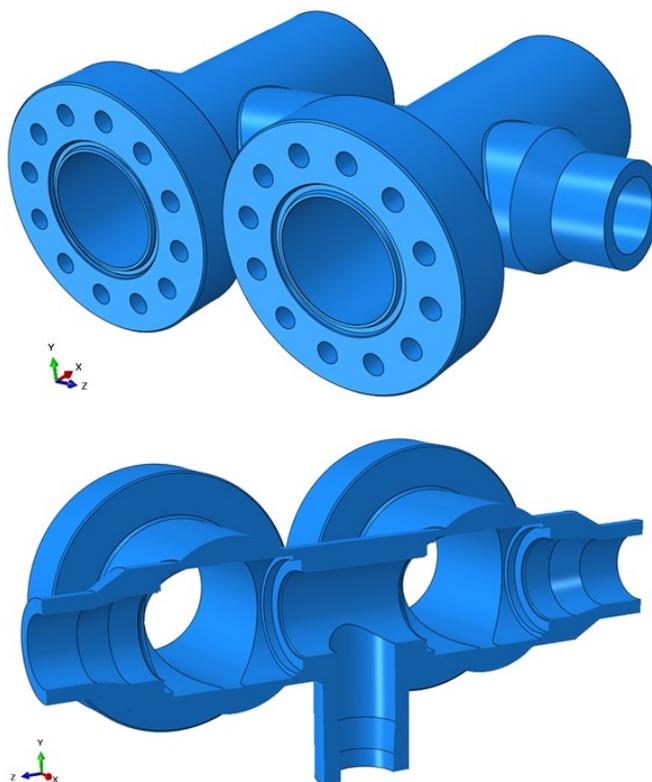
é preciso realizar alguns ajustes para que o modelo se comporte de forma correta no software de cálculo.

Figura 13: Malha de cálculo



Fonte: Os autores

Figura 14: Geometria simplificada do bloco de válvulas para ser utilizado no Abaqus.



Fonte: Os autores.

Considerou-se também a força da gravidade atuando sobre todo o modelo, com valor nominal de $9,81 \text{ m/s}^2$. No entanto, aplicou-se um fator de segurança de $CS = 1,5$

sobre o peso do equipamento, resultando em uma aceleração da gravidade a ser aplicada de $14,72 \text{ m/s}^2$.

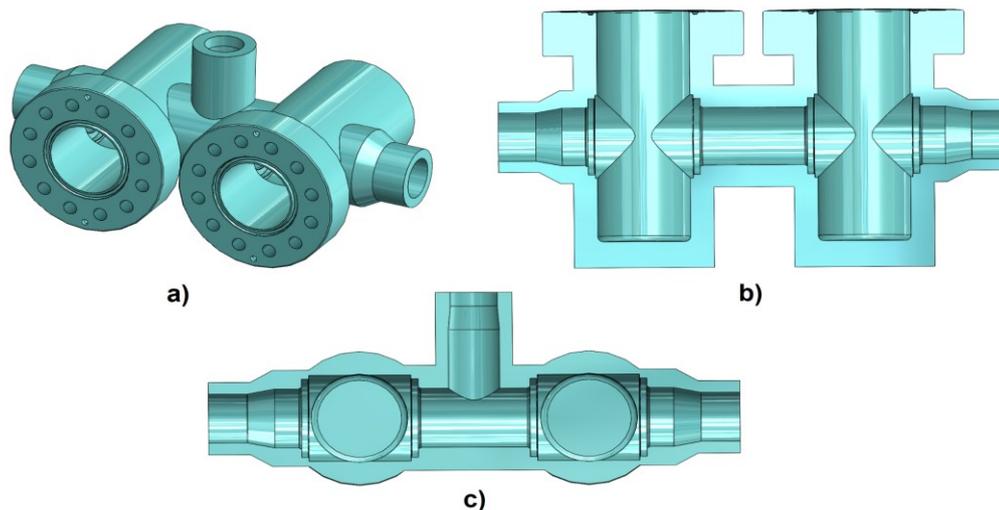
Com todas essas condições aplicadas na configuração do modelo, realizou-se o cálculo computacional que durou aproximadamente 14 minutos, e foi realizado via um computador remoto que se localiza fisicamente na Noruega. Somando as horas de levantamento de dados, definição dos parâmetros e preparação do modelo, foram gastas aproximadamente 16 horas para realizar o processo de cálculo de integridade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Modelagem e desenhos de fabricação

A figura 14 apresenta o Modelo do bloco de HIP pronto para detalhamento, as imagens b) e c) são vistas em corte apresentando as cavidades internas.

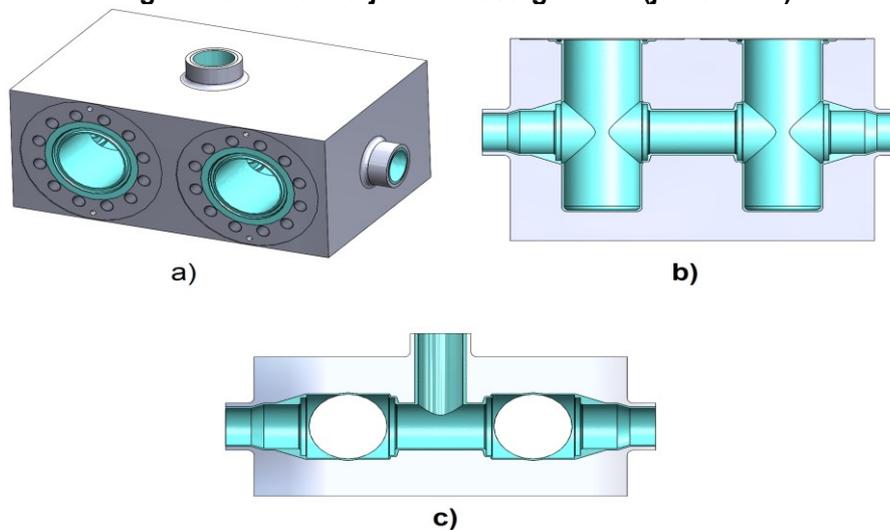
Figura 14: Modelo 3D do bloco de HIP.



Fonte: Os autores.

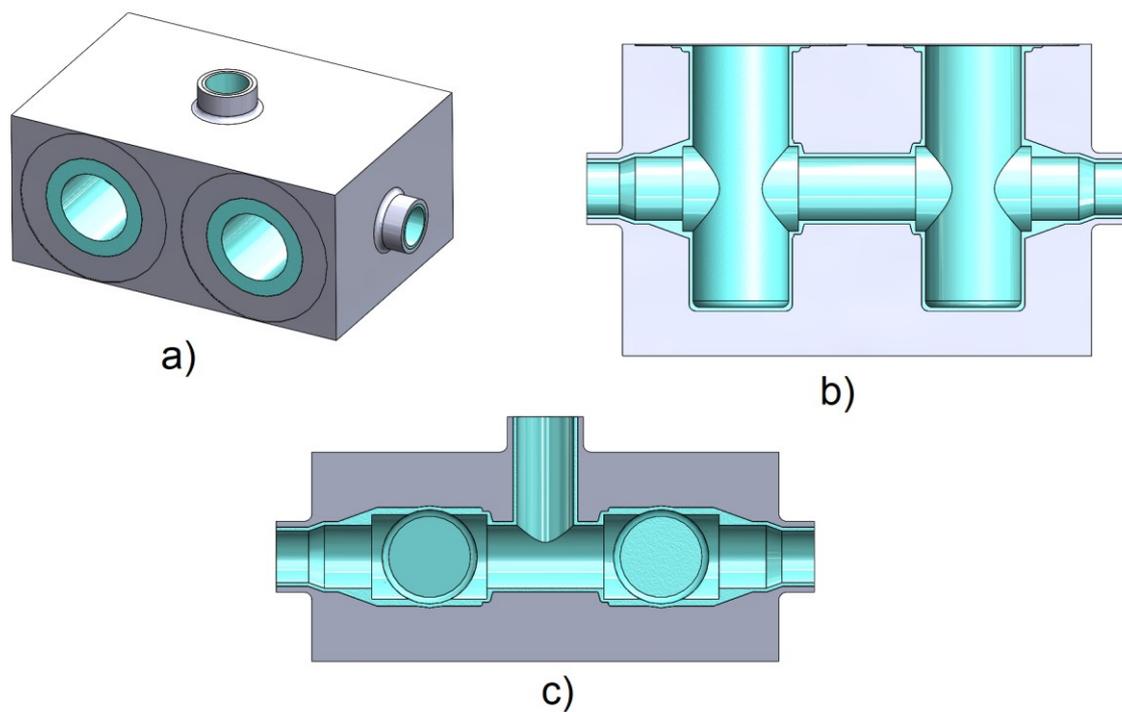
A figura 15 apresenta o modelo do bloco forjado na sua geometria final, após passar por processo de pré-usinagem, cladeamento e usinagem final. As imagens b) e c) são cortes apresentando as cavidades internas do bloco.

Figura 15: Bloco forjado em estágio final (já usinado).



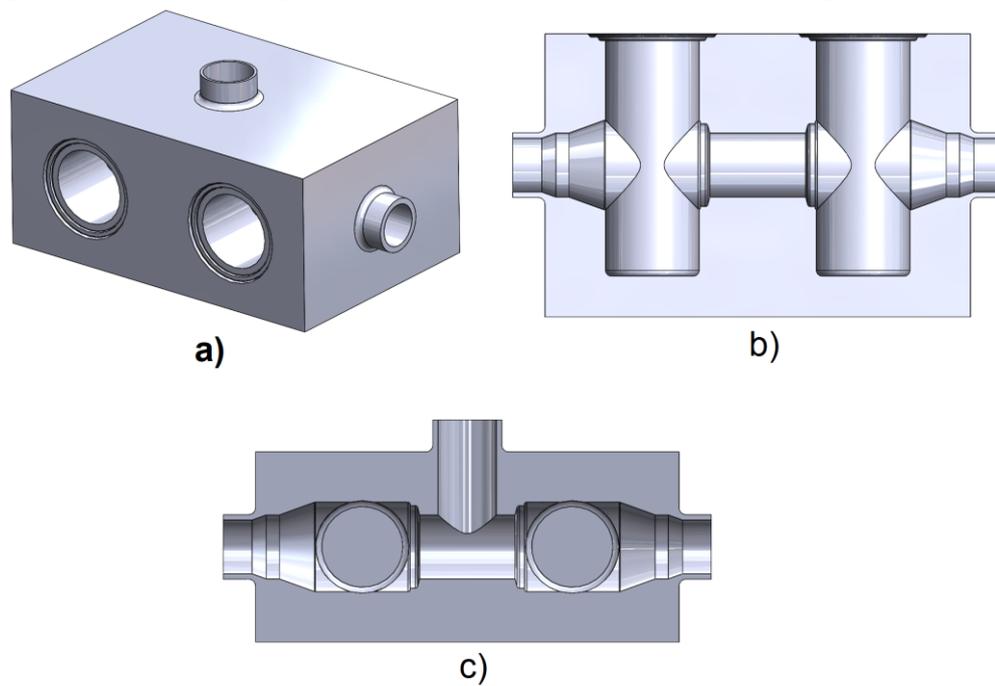
Fonte: Os autores.

Figura 16: Apresenta a geometria interna do bloco forjado no estágio de cladeamento.



Fonte: Os autores.

Figura 17: Apresenta a geometria interna do bloco forjado no estágio de pré-clad.



Fonte: os autores.

5.2 Resultados de cotação

Os resultados obtidos a partir do processo de cotação realizado juntamente com os fornecedores de forjado e HIP podem ser encontrados na tabela 5 abaixo. O menor valor de cotação do forjado foi considerado como 1, e os demais foram calculados com base nesta referência. O total de horas de processamento interno estimadas para a finalização da produção do bloco forjado é de 435 horas, enquanto para o bloco produzido a partir do HIP, que precisa apenas de usinagem final e ajustagem, o tempo estimado de processamento é de 190 horas. O Fornecedor de HIP 2 informou o preço da sua peça já usinada na geometria final, e para esse bloco não foram consideradas horas de manufatura adicionais.

Tabela 5: Dados de cotação dos fornecedores.

Fornecedor:	Fornecedor de HIP 1	Fornecedor de HIP 2		Fornecedor de Forjado 1	Fornecedor de Forjado 2
Estágio de acabamento:	Posterior ao HIP	Posterior ao HIP	Usinado (geometria final)	Pré-Clad	Pré-Clad
Material:	Super Duplex	Super Duplex	Super Duplex	AISI 8630 80ksi	A182 F22M 80ksi
Preço:	2,26	3,39	5,27	1	1,4
Lead Time de produção (semanas):	15,5	14	20	14	8
Custo do processo de fabricação interno:	0,44	0,44	0	1	1
Lead Time de manufatura interna (semanas):	5	5	0	11	11
Custo total de fabricação da peça:	1,11	1,53	1,96	1	1,15
Lead Time Total (semanas)	20,5	19	20	25	19

Fonte: os autores.

O custo do bloco de HIP adquirido em estágio imediatamente posterior ao processo de HIP é 126% mais caro do que o forjado de 8630 em estágio de pré-clad (como comumente é adquirido pela Aker Solutions). O estágio do bloco imediatamente após o processo de HIP ou seja, no qual o bloco precisa passar por processos de fabricação internos para atingir a geometria final desejada, é análogo ao bloco forjado em estágio de pré-clad, que também precisará sofrer operações internas.

Após os processamentos internos necessários, que no caso do bloco forjado são consideravelmente mais numerosos e onerosos que os necessários para o bloco de HIP, o custo final do bloco que partiu do forjado é 11% mais barato que o bloco

que partiu do HIP e precisou ser manufaturado internamente, e ainda possui *lead time* praticamente igual, o que demonstra a vantagem econômica da compra do bloco forjado e realização do processo de manufatura internamente, em detrimento de comprar o bloco de HIP e também manufaturá-lo internamente.

Já em comparação com a compra do bloco de HIP em estágio final, com a geometria final desejada, a compra do bloco forjado de 8630 e sua manufatura interna, o custo do forjado é 96% mais barato. No entanto, o bloco de HIP comprado na sua geometria final tem um *lead time* de 5 semanas a menos do que o bloco forjado de 8630, o que em alguns casos de emergência, ou de cronogramas muito apertados poderia fazer valer a pena a compra do bloco em HIP na geometria final.

Realizando a mesma comparação com o bloco de aço A182 F22, o bloco em HIP na geometria final é 81% mais caro que o bloco forjado manufaturado internamente, e possui *lead time* de uma semana a mais. Portanto, para as situações de cronograma citadas anteriormente, caso seja possível devido aos requisitos de projeto, ainda seria mais vantajoso economicamente comprar o bloco forjado de F22 ao invés do bloco em HIP quando o desafio é *lead time*.

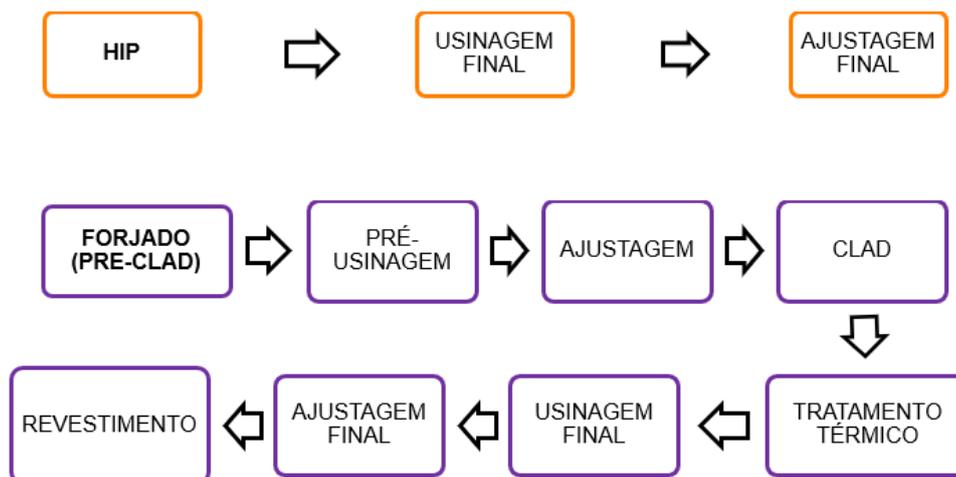
Em suma, considerando as duas melhores cotações tanto para o bloco de HIP quanto para o forjado, verifica-se que o bloco de HIP com manufatura finalizada internamente é 11% mais caro que o bloco forjado também processado internamente, no entanto o seu *lead time* é 5 semanas menor do que o *lead time* do forjado.

O Fornecedor de HIP 1 apresentou cotação para dois cenários, o primeiro com a compra de um único bloco, e o segundo com a compra de 5 unidades. Com o aumento do volume em 5 vezes o preço por unidade do bloco é reduzido em cerca de 33%. Este resultado demonstra que existe uma diluição de preço considerável quando se aumenta o volume de peças de um pedido de HIP.

Em reunião com o fornecedor foi explicado aos alunos que no processo de HIP a etapa que demanda mais tempo e investimento é a de definição dos parâmetros de processo, pois depende de uma série de dados que foram obtidos empiricamente pelo fornecedor, e que irão definir como irá ocorrer o comportamento da cápsula e da matéria prima durante o HIP. Uma vez definidos esses parâmetros e delineada a geometria da cápsula, a reprodutibilidade do processo é garantida e dessa forma os custos fixos relacionados às etapas de definição dos parâmetros podem ser diluídos no volume de produção.

Para contribuir com o completo entendimento das etapas de processamento interno que o bloco precisa ser submetido quando proveniente de cada método de fabricação, a figura 18 apresenta um fluxograma com cada uma das etapas:

Figura 18: Fluxograma de processos internos a serem executados após cada um dos métodos de fabricação.



Fonte: Os autores.

5.3 Resultados do cálculo de integridade do bloco

Os resultados do estudo de cálculo serão apresentados de acordo com dois cenários diferentes, o primeiro de pressurização de um dos dois *bores*, e o segundo de pressurização de ambos os *bores*, com o objetivo de representar os dois cenários possíveis durante a operação.

5.3.1 Cenário 1: Pressurização de apenas um dos bores.

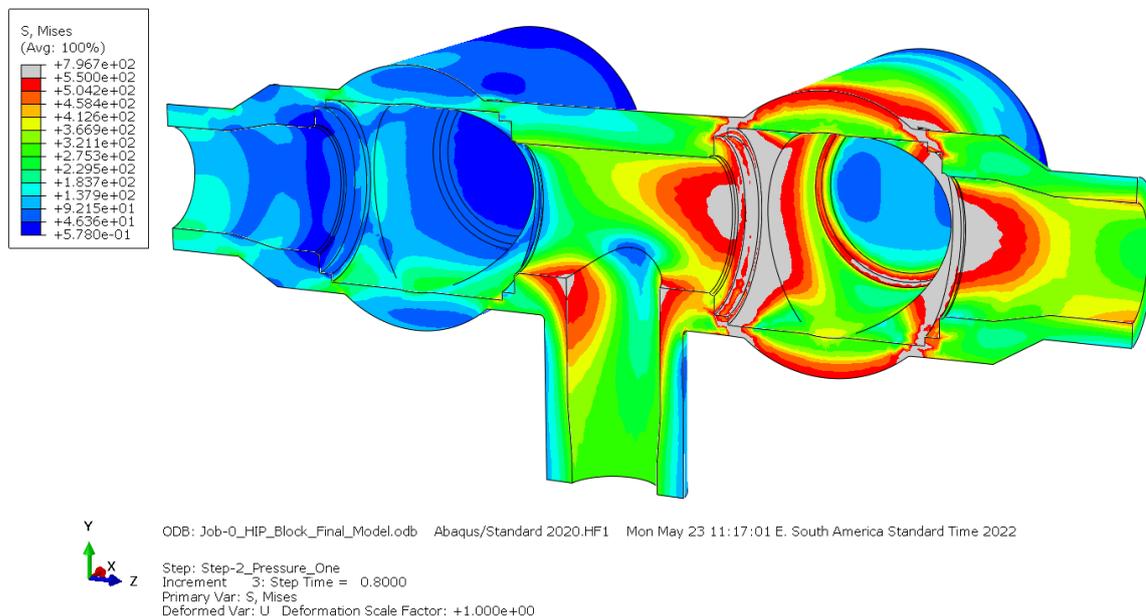
Durante a pressurização de apenas um dos *bores*, o bloco de válvulas falhou segundo os critérios de aceitação da ISO 13628-7. A falha ocorreu tanto para a pressão de trabalho quanto para a pressão de teste.

5.3.1.1 Resultados de Tensão de Von Misses

A figura 18 apresenta o resultado do campo de tensões de Von Misses na região interna do bloco onde se localizam as sedes das válvulas, para a pressão aplicada de 103,42 MPa (15.000 psi - pressão de trabalho com fator de segurança). A legenda está limitada à 550 MPa, que representa a tensão de escoamento do material. As regiões às quais foram atribuídas a cor cinza são aquelas em que a tensão de Von Misses ultrapassa o valor de 550 MPa, sendo que o valor máximo atingido foi de 796,7

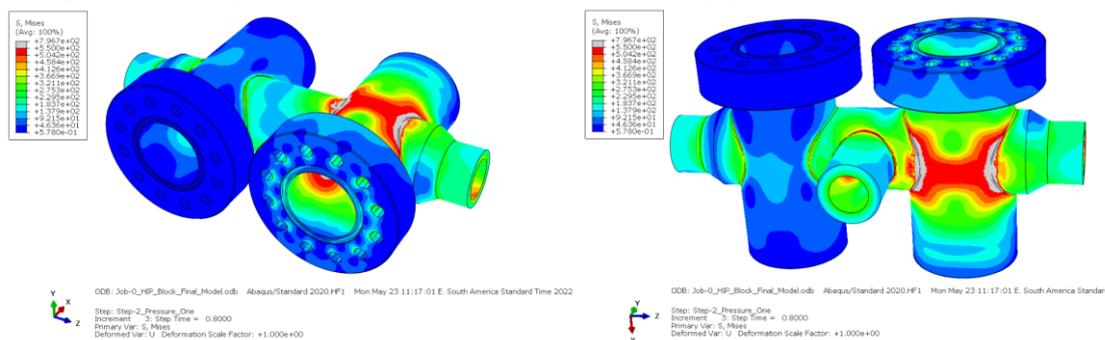
MPa. A figura 19, por sua vez, apresenta o mesmo resultado comentado neste parágrafo para as regiões externas do bloco.

Figura 19: Campo de tensão de Von Mises (interno), pressão de trabalho.



Fonte: os autores.

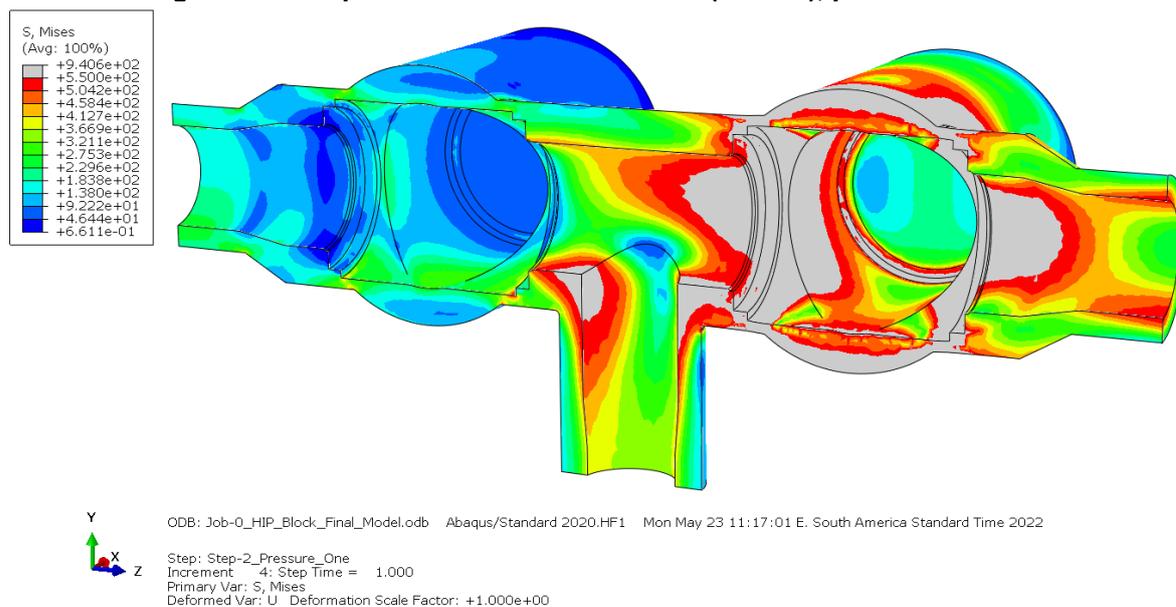
Figura 20: Campo de tensão de Von Mises (Externo), pressão de trabalho.



Fonte: os autores.

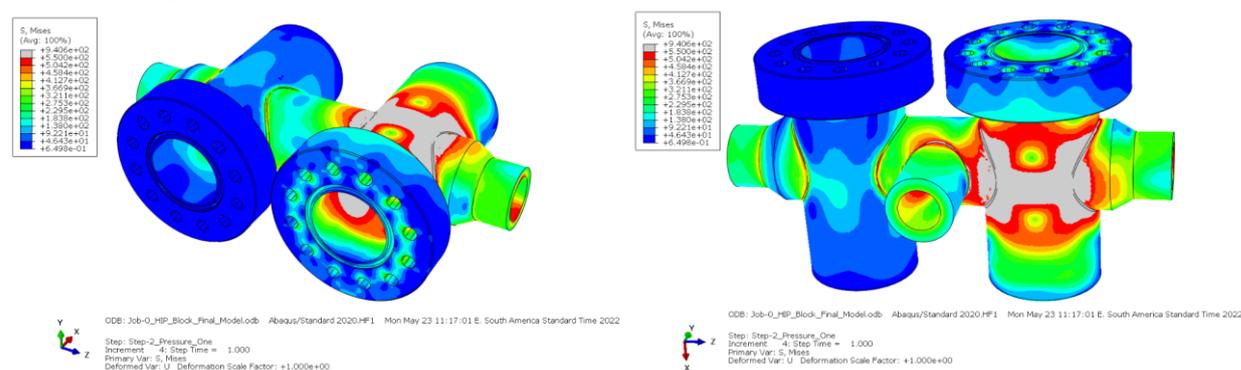
A figura 20 representa a pressão aplicada de 129,28 MPa (18.750 psi - pressão de teste com fator de segurança), e suas legendas limitam-se a 550 MPa. Nesta ocasião, a tensão máxima de Von Mises atingida foi de 940,6 MPa, e as regiões coloridas em cinza foram aquelas em que o limite de escoamento do material foi ultrapassado. A figura 21, por sua vez, apresenta o mesmo resultado comentado neste parágrafo para as regiões externas do bloco.

Figura 21: Campo de tensão de Von Mises (Interno), pressão de teste.



Fonte: os autores.

Figura 22: Campo de tensão de Von Mises (Externo), pressão de teste.

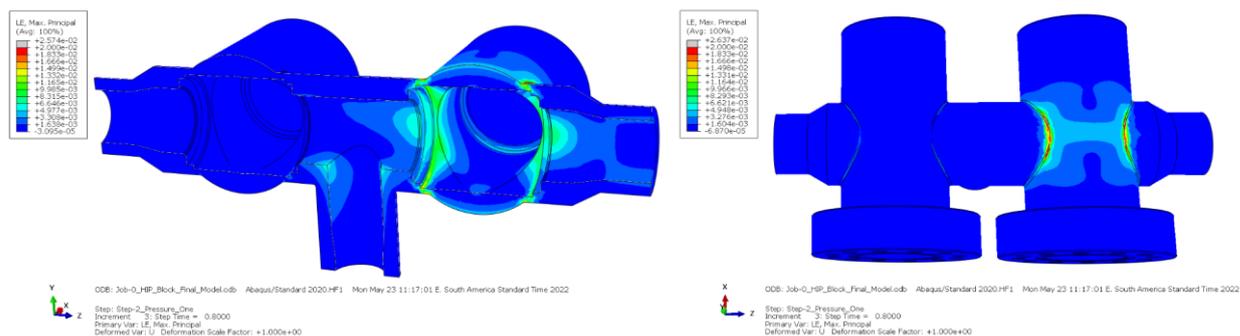


Fonte: os autores.

5.3.1.2 Resultados de deformação

Já que a tensão máxima calculada para pressão de trabalho ultrapassa a tensão de escoamento do material, verificou-se deformações do bloco. O valor máximo da deformação logarítmica calculado para este caso foi superior a 2%, ultrapassando 2,6% na região de encontro das geometrias do canal de ligação entre os bores, apresentadas em cinza na figura 22. Portanto, conclui-se que o bloco está reprovado para operação de trabalho pelos critérios de aceitação da ISO 13628-7.

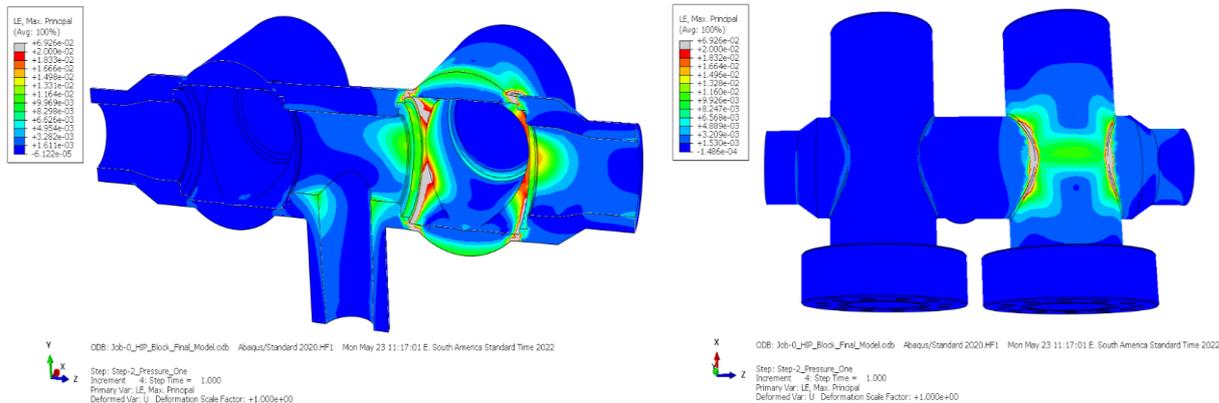
Figura 23: Deformação logarítmica máxima, pressão de trabalho.



Fonte: os autores.

Para a pressão de teste, como era esperado, o resultado também foi de reprovação. Verifica-se, na figura 23, que a deformação logarítmica máxima atingida foi de quase 7%, e está representada na imagem pelas regiões em cinza, que neste caso são bem mais visíveis do que no caso de pressão de trabalho, e, portanto, o bloco está reprovado também para a operação de teste.

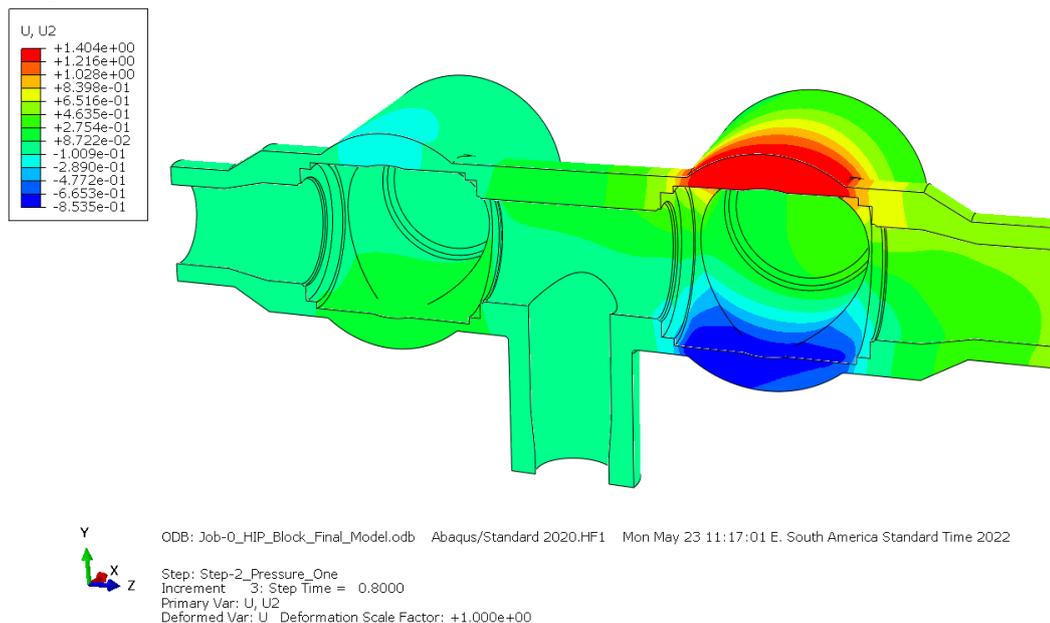
Figura 24: Deformação logarítmica máxima, pressão de teste.



Fonte: os autores.

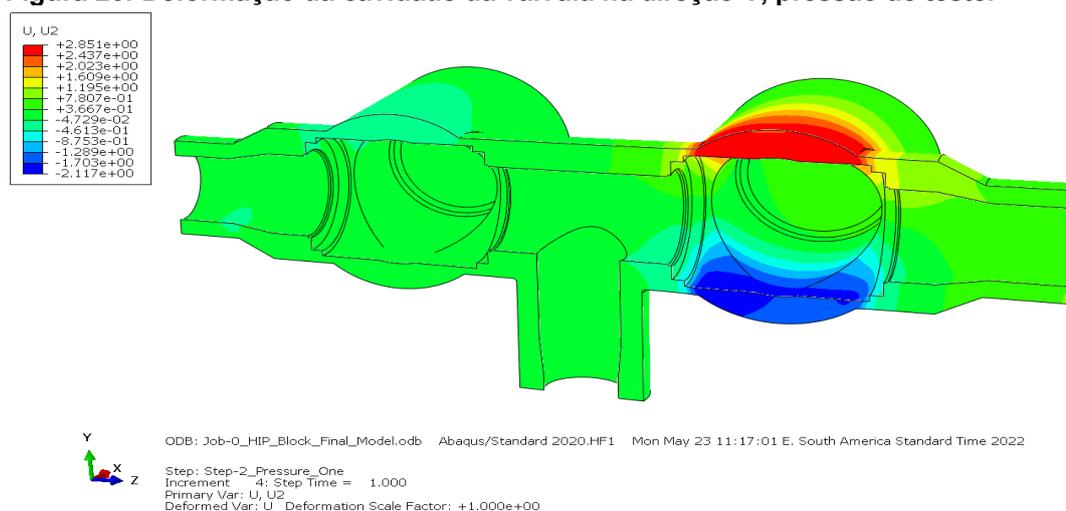
A deformação da cavidade da válvula na direção Y também foi bastante significativa, apesar de não ser o objetivo do cálculo, verificou-se que esse deslocamento não permitiria a vedação da cavidade da válvula, que deve permanecer na ordem de centésimos. Para o cenário de pressão de trabalho a deformação atingiu valores de aproximadamente 1,4 milímetros na direção positiva de Y como mostrado na figura 24. Para a pressão de teste os valores de deformação ultrapassaram os 2,8 milímetros na direção positiva de Y, e aproximadamente 2,1 milímetros na direção negativa, como apresentado na figura 25.

Figura 25: Deformação da cavidade da válvula na direção Y, pressão de trabalho.



Fonte: os autores.

Figura 26: Deformação da cavidade da válvula na direção Y, pressão de teste.



Fonte: os autores.

5.3.2 Cenário 2: Pressurização de ambos os bores.

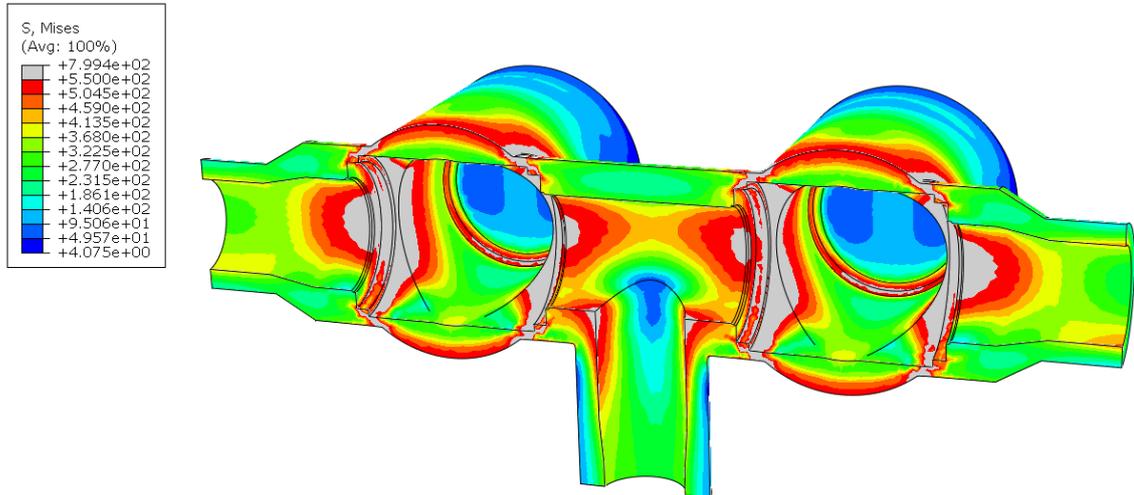
Após os resultados obtidos na pressurização concomitantemente de ambos os bores, houve a falha do bloco de válvulas segundo os critérios de aceitação da ISO 13628-7, tanto para a pressão de trabalho, quanto para a pressão de teste.

5.3.2.1 Resultados de Tensão de Von Misses

Assim como no Cenário 1 acima, a figura 26 apresenta o resultado do campo de tensões de Von Misses na região interna do bloco, para uma pressão aplicada de

103,42 MPa (15.000 psi). O valor máximo de tensão atingido foi de 799,4 MPa, e está representado na figura na cor cinza. A figura 27 apresenta o mesmo resultado comentado neste parágrafo, porém para as regiões externas do bloco, onde a tensão máxima atingida foi de 805,1 MPa.

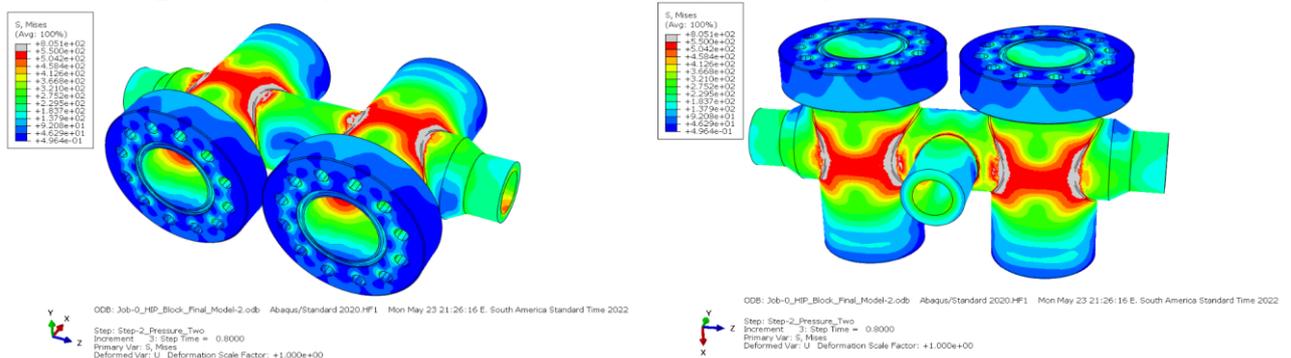
Figura 27: Campo de tensão de Von Mises (Interno), pressão de trabalho.



Y ODB: Job-0_HIP_Block_Final_Model-2.odb Abaqus/Standard 2020.HF1 Mon May 23 21:26:16 E. South America Standard Time 2022
 X Z
 Step: Step-2_Pressure_Two
 Increment: 3; Step Time = 0.8000
 Primary Var: S, Mises
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

Fonte: os autores.

Figura 28: Campo de tensão de Von Mises (Externo), pressão de trabalho.

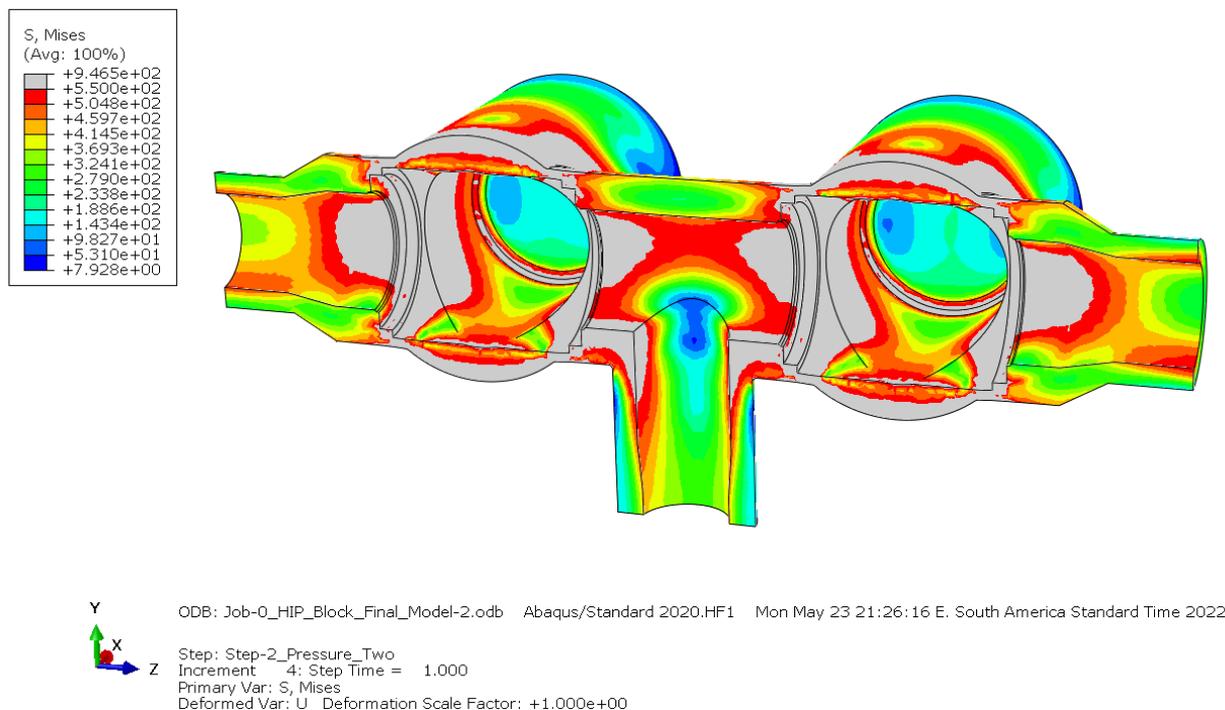


Fonte: os autores.

Na figura 28, observa-se os resultados dos testes realizados em condições de pressão aplicada de 129,28 MPa (18.750 psi). A tensão máxima de Von Mises atingida foi de 946,5 MPa, sendo que as regiões coloridas em cinza representam aquelas que ultrapassaram o limite de escoamento do material. A figura 29 demonstra

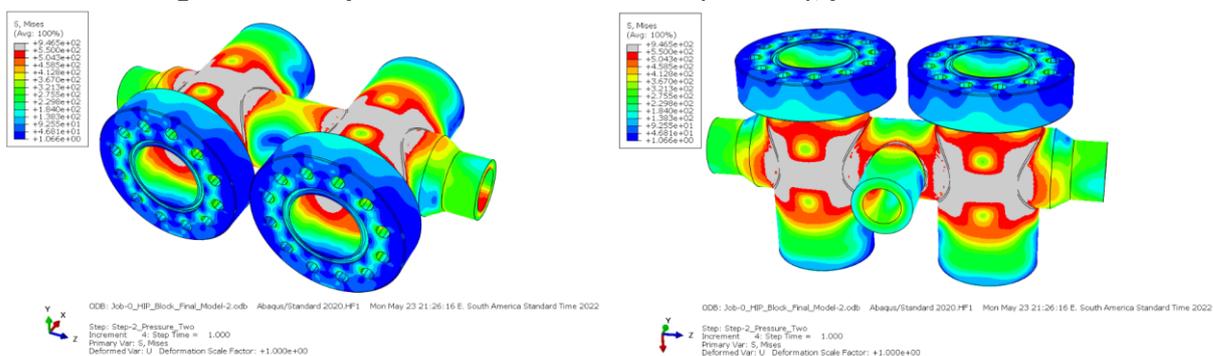
o mesmo resultado comentado neste parágrafo, porém para as regiões externas do bloco, onde a tensão máxima atingida também foi de 946,5 MPa.

Figura 29: Campo de tensão de Von Mises (Interno), pressão de teste.



Fonte: os autores.

Figura 30: Campo de tensão de Von Mises (Externo), pressão de teste.



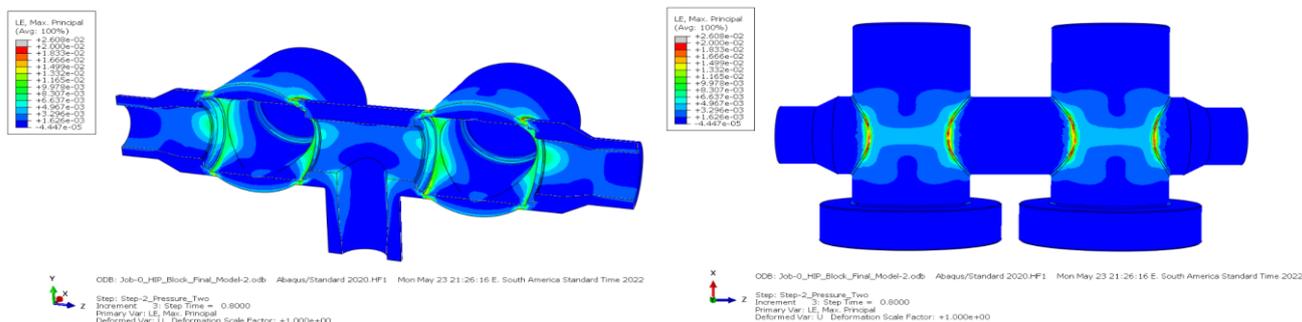
Fonte: os autores.

5.3.2.2 Resultados de deformação logarítmica

Avaliando a deformação logarítmica do bloco neste cenário, em que os dois bores estão sob pressão de trabalho, o valor máximo de deformação logarítmica calculado para este caso foi de aproximadamente 2,6%, representado na figura 30 pelas regiões coloridas em cinza. Conclui-se, então, que o bloco está reprovado para

operação de trabalho nesse cenário, conforme os critérios de aceitação da ISO 13628-7.

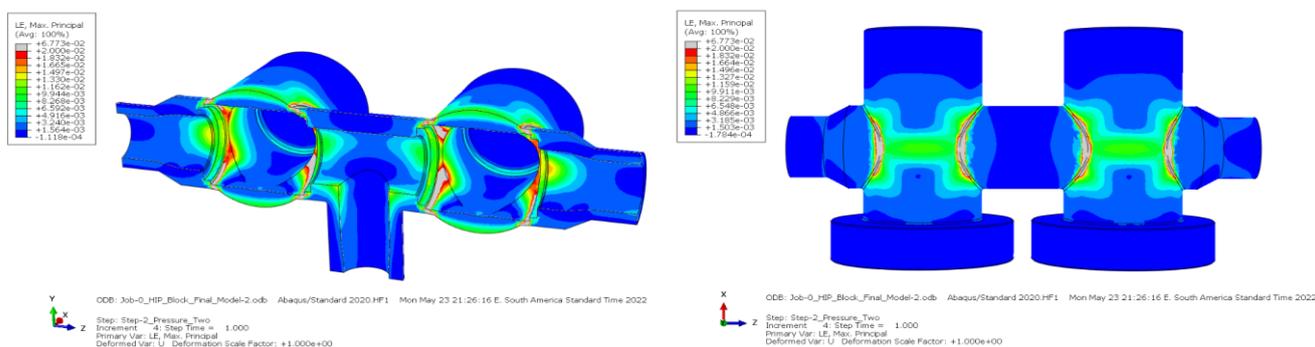
Figura 31: Deformação do bloco, pressão de trabalho.



Fonte: os autores.

Para a pressão de trabalho, como era esperado, o resultado também foi de reprovação. Isto porque, conforme se extrai da figura 31, a deformação logarítmica máxima atingida foi de quase 7%, representada na imagem pelas regiões coloridas em cinza que, neste caso, são mais visíveis do que na hipótese de pressão de teste.

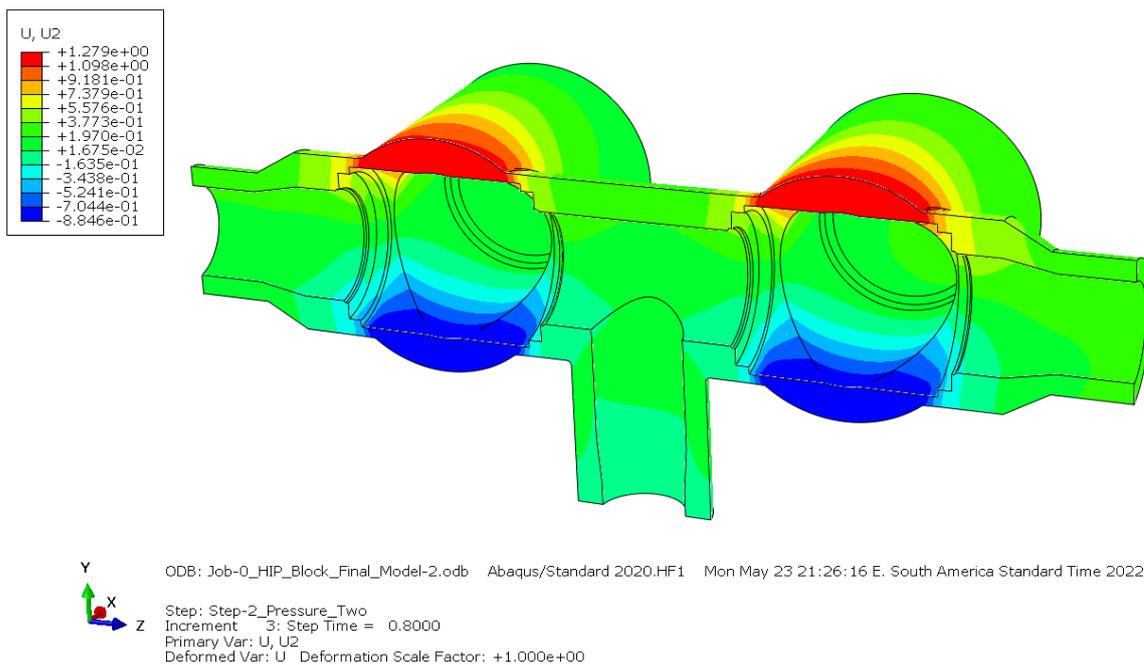
Figura 32: Deformação logarítmica máxima, pressão de trabalho.



Fonte: os autores.

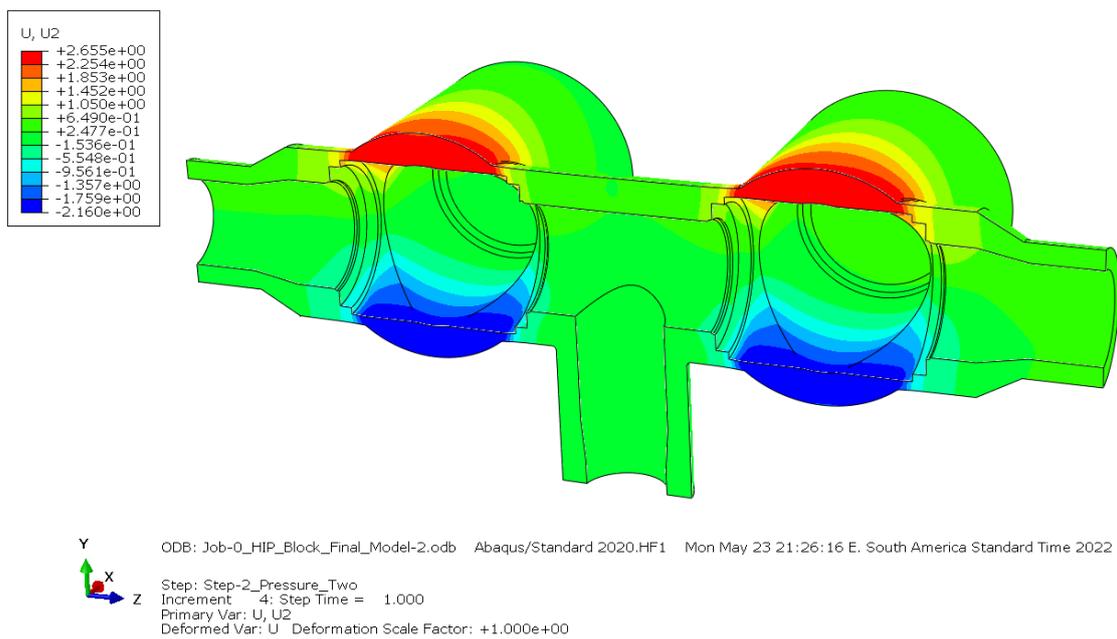
A deformação da cavidade da válvula na direção Y foi de aproximadamente 1,3 milímetros no sentido positivo de Y para pressão de trabalho, conforme se infere da figura 32. Para a pressão de teste, o valor de deformação supera os 2,6 milímetros, conforme figura 33.

Figura 33: Deformação da cavidade da válvula na direção Y (Interno), pressão de trabalho.



Fonte: os autores.

Figura 34: Deformação da cavidade da válvula na direção Y (Interno), pressão de teste.



Fonte: os autores.

A tabela 6 abaixo apresenta um breve resumo dos resultados discutidos anteriormente.

Tabela 6: Resumo dos resultados.

Propriedade	Cenário 1 - Pressão de trabalho (15KPsi)	Cenário 1 - Pressão de teste (18.750 KPsi)	Cenário 2 - Pressão de trabalho (15 KPsi)	Cenário 2 - Pressão de teste (18.750 KPsi)
Tensão máxima (MPa)	796,7	940,6	805,1	946,5
Deformação logarítmica máxima	2,6%	6,93%	2,6%	6,77%
Deformação máxima na região da cavidade da válvula (mm)	1,4	2,35	1,28	2,66

Fonte: Os Autores

Portanto, uma vez identificada a falha do modelo no estudo de integridade do bloco, levanta-se algumas hipóteses para o ocorrido:

- Geometria provavelmente subdimensionada, uma vez que a origem do modelo partiu de um processo de Tender onde um dos pilares do projeto era a redução de peso. Assim o desenvolvimento do modelo foi bastante ambicioso, reduzindo drasticamente a espessura de parede do bloco.

- Geometria com muitos pontos concentradores de tensão, como cantos vivos e reduções bruscas de diâmetro e área de seção.

- Para alcance da viabilidade técnica do processo HIP, acredita-se na possibilidade de otimização da geometria do bloco ao aliviar os cantos vivos e reduzir a angulação dos *bores*, para que a troca de direção do fluxo ocorra suavemente, e não de forma brusca como em um ângulo de 90°. Além do aumento da espessura de parede do bloco, que garantiriam a integridade nas principais áreas afetadas.

Já para a não comprovação da viabilidade econômica do modelo, as hipóteses levantadas foram:

- A grande diferença de valor da cotação do Real no ano de 2022 em comparação com o Dólar, pode ter sido um fator decisivo para os valores finais de cotação obtidos.

- Devido a geometria relativamente simples do bloco estudado, onde os processos de usinagem a serem executados no bloco forjado não representaram um montante de horas relevante, ou impediram a execução da operação, a peça em HIP

não apresentou vantagens financeiramente. No entanto, se houver um aumento da complexidade e da quantidade de processos de usinagem aos quais a peça precisa ser submetida, o HIP se torna cada vez mais competitivo.

- Para tornar viável a aplicação da tecnologia HIP, é possível considerar a hipótese de nacionalização da tecnologia, uma vez que todas as cotações realizadas neste estudo foram obtidas com empresas estrangeiras. Desta maneira seria possível reduzir os custos de mão de obra e de logística que contribuem para a formação do preço final do produto.

- O tamanho do lote de peças solicitado ao fornecedor também se mostrou um aspecto decisivo para a viabilidade econômica. Para lotes maiores onde os custos de definição dos parâmetros possam ser diluídos, o HIP pode vir a se tornar economicamente viável.

Desta maneira, é possível dizer que conforme elevasse a complexidade, volume da peça e o tamanho do lote a ser produzido, o valor de implementação do processo HIP vai se tornando mais vantajoso em comparação com o valor de uma peça forjada, ao ponto em que o processo pode vir a se tornar vantajoso economicamente, ou ao menos viável.

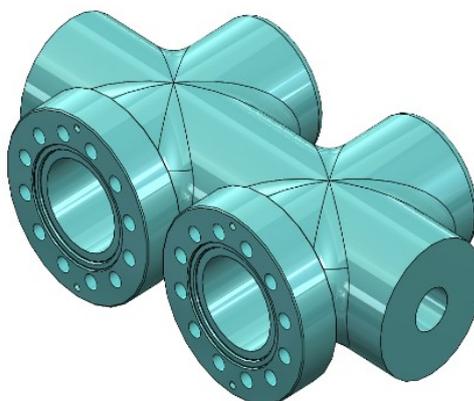
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Otimização da geometria do bloco

Os resultados de cotação apresentaram valor apenas 11% superior para o bloco de HIP, e *lead time* 5 semanas inferior. Contudo, uma vez que os resultados não foram aprovados em cálculo de integridade, sugere-se que para trabalhos futuros a geometria do bloco seja novamente trabalhada, para que o resultado ideal de deformação e vedação seja obtido no teste de integridade. Além disso, deve-se realizar nova cotação com os fornecedores para verificar os valores referentes a este novo modelo.

Durante a execução deste trabalho, tentativas de otimização da geometria do bloco foram realizadas. No entanto, tais modificações resultariam em alterações do valor cotado e, devido ao cronograma, não seria possível realizar nova cotação a tempo. A figura 34 abaixo apresenta uma sugestão de geometria otimizada para o bloco.

Figura 35: Sugestão de geometria otimizada para o bloco.



Fonte: Os autores.

6.2 Outro objeto de estudo

Sugere-se, para trabalhos futuros, a análise da aplicação do HIP às peças cuja geometria seja mais complexa, como é o caso do *Master Valve Block* - Bloco Principal de Válvulas, que possui grandes dimensões. Isto porque, se comparado ao método de usinagem, que é predominantemente linear para os canais deste bloco, e deve passar por diversos processos a partir de uma peça forjada, o HIP pode tornar a fabricação mais viável econômica e tecnicamente.

Na fabricação de peças com geometria mais simples este benefício econômico não assume papel de destaque, visto que os custos não são tão discrepantes.

6.3 Estudo de nacionalização da tecnologia

Todos os dados de fornecedores coletados neste trabalho foram baseados em empresas estrangeiras. Devido à cotação atual do Real frente às moedas norte-americana e europeia, a fabricação de uma peça em HIP tornou-se inviável economicamente.

Não se constatou a existência de empresas ou instituições que atuem na fabricação de peças em HIP com metalurgia do pó no Brasil ou países próximos. Contudo, se a execução do objeto de estudo deste trabalho for cotado nacionalmente ou em países com moedas cujo valor econômico se aproxime do Real, tornar-se-á viável.

Não existindo fabricantes nacionais que façam uso da tecnologia HIP com metalurgia do pó, sugere-se o estudo técnico e econômico para a nacionalização desta.

6.4 Estudo comparativo entre complexidade e viabilidade

Para aqueles que pretendem utilizar a tecnologia HIP para a fabricação de peças, sugere-se a criação de mecanismos de definição que estabeleçam o grau de complexidade da peça, em relação ao seu tamanho, cujos resultados poderão ser utilizados na tomada de decisão para substituição da fabricação a partir de um forjado pela tecnologia HIP.

O estudo realizado ao longo deste trabalho teve como objetivo realizar a comparação dos métodos de fabricação aplicados a uma peça específica. No entanto, ampliando o campo de estudo para outras peças, torna-se possível descrever a partir de que configuração uma peça pode ser fabricada a partir do HIP e ainda gerar uma economia no processo produtivo.

6.5 Estudo sobre a tecnologia HIP juntamente com a manufatura aditiva

A partir dos estudos referenciais do presente trabalho, concluiu-se que o HIP é, em sua maioria, utilizado como uma etapa pós-processamento de peças, e não para a fabricação propriamente dita. O processo HIP serve, primordialmente, para

reduzir a porosidade de peças, independente da sua origem de fabricação. Desta forma, obtém-se uma peça a partir de tecnologias de manufatura aditiva, e utiliza-se o HIP apenas para a densificação do material.

Assim, o preço de fabricação é reduzido drasticamente, já que o valor para a produção de uma peça inteiramente pela tecnologia HIP é diretamente proporcional ao desenvolvimento, produção e posterior remoção do molde para acomodação.

7. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos e dos objetivos propostos nesse trabalho, pode-se concluir que:

- A viabilidade técnica e econômica do processo HIP em substituição ao forjamento convencional, no caso em estudo, não pode ser demonstrada.
- Na geometria proposta as tensões pelo critério de Von Mises ultrapassaram os valores máximos de projeto, assim como as deformações máximas admissíveis pela norma, como demonstrado pelos resultados obtidos nas simulações numéricas.
- O processo do HIP foi compreendido profundamente, assim como assimilado todo o seu valor agregado.
- Foi possível o desenvolvimento de uma proposta de design dentro dos parâmetros do HIP, mesmo que não tenha sido comprovada a sua viabilidade técnica.
- O modelo proposto foi orçado juntamente com quatro fornecedores reconhecidos no mercado.

REFERÊNCIAS

AHLFORS, Magnus *et al.* HIP for AM – **OPTIMIZED MATERIAL PROPERTIES BY HIP. HOT ISOSTATIC PRESSING. 12th International Conference on Hot Isostatic Pressing (HIP'17)**. Sydney, Australia, 2017

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário Estatístico 2021**. Brasília, Ministério de Minas e Energia, 2021.

ASHWORTH, M.A *et al.* **BASIC MECHANISMS AND INTERFACE REACTIONS IN HIP DIFFUSION BONDING**. Materials and Design 21, [s. l.], 2000.

BRANSKI, Regina Meyer; FRANCO, Raul Arellano Caldeira. JR LIMA, Orlando Fontes. **METODOLOGIA DE ESTUDO DE CASOS APLICADA À LOGÍSTICA**. XXIV ANPET. Salvador, 2010.

BRESCIANI Filho, Ettore (coord.); ZAVAGLIA, Cecília Amélia Carvalho; BUTTON, Sérgio Tonini; GOMES, Edson; NERY Fernando Antonio da Costa. **CONFORMAÇÃO PLÁSTICA DOS METAIS**. 6.ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2011.

BRITO, Iran Gomes de; MEDEIROS, Katarine F.; LOURENÇO, Jorge Magner. **UM ESTUDO TEÓRICO SOBRE A SINTERIZAÇÃO NA METALURGIA DO PÓ**. Holos, [s. l.], v. 3, ed. 23, p. 204-211, 2007.

DAYAL, Pranesh; TRIANI, Gerry. **HOT ISOSTATIC PRESSING. 12th International Conference on Hot Isostatic Pressing (HIP'17)**. Sydney, Australia, 2017.

EKLUND, Dr. Anders; AHLFORS, Dr. Magnus. **HIP TECHNOLOGY ENABLES CERAMIC MANUFACTURERS TO CONTROL MATERIAL PROPERTIES AND INCREASE PRODUCTIVITY. HOT ISOSTATIC PRESSING. 12th International Conference on Hot Isostatic Pressing (HIP'17)**. Sydney, Australia, 2017.

GALA, Paulo. **BREVE HISTÓRIA DO MONOPÓLIO DO PETRÓLEO NO BRASIL**. Money Times, agosto de 2020. Disponível em: <https://www.moneytimes.com.br/breve-historia-do-monopolio-petroleo-no-brasil-vamos-vender-tudo-para-os-gringos/> Acesso em: 11/10/2021.

HELMAN, Horacio; CETLIN, Paulo Roberto. **FUNDAMENTOS DA CONFORMAÇÃO MECÂNICA DOS METAIS**. Editora Artliber. São Paulo SP, 2015.

LEITE, Leonardo Amaral dos Santos Barroso. **UTILIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA NO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE UM FLANGE API 17D**. Universidade Federal Fluminense. Rio das Ostras, RJ, 2020.

LIPPOLD, J.C., Kiser, D, Dupont, N. **WELDING METALLURGY AND WELDABILITY OF NICKEL BASED ALLOYS**. John Wiley & Sons, 2011.

OLIVEIRA, Nicole. **CONHEÇA ALGUNS IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS PELO USO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS**. Observatório do Petróleo e Gás. Disponível em: <https://www.observatoriodopetroleo.org/conheca-alguns-impactos-ambientais-causados-pelo-uso-de-combustiveis-fosseis/> Acesso em: 11/10/2021.

PIRES, Adriano; RODRIGUES, Pedro. **O FUTURO DOS COMBUSTÍVEIS DEPOIS DA PANDEMIA**. Poder 360, 2020. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/opiniao/+economia/o-futuro-dos-combustiveis-fosseis-depois-da-pandemia-por-adriano-pires-e-pedro-rodrigues/>. Acesso em: 11/10/2021.

PACHECO, Aluizio; NASCIMENTO, Leonardo Sant'Anna; FAISCA, Renata. **COMPARATIVE STUDY OF DESIGN METHODOLOGIES REGARDING A SHALLOW FOUNDATION OF A PIPELINE END MANIFOLD (PLEM)**. Rio Oil & Gas Expo and Conference, 2020. Rio de Janeiro, 2020.

SHIOKAWA, Toyohito *et al.* **HIP PROCESS OF A VALVE BODY TO NEAR-NET-SHAPE USING GRADE 91 POWDER**. 12th International Conference on Hot Isostatic Pressing (HIP'17). Sydney, Australia, 2017.

SOUZA, Everton Duarte. **ESTUDO COMPARATIVO PARA FABRICAÇÃO DE PEÇAS AERONÁUTICAS: FORJAMENTO X USINAGEM**. Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2015.

THOMAS, José Eduardo. **FUNDAMENTOS DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO**. Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2004.

WANG, Yngying; DUAN, Menglan; FENG, Junkai; MAO, Dongfeng; XU, Minghua; ESTEFEN, Segen F. **MODELING FOR THE OPTIMIZATION OF LAYOUT**

SCENARIOS OF CLUSTER MANIFOLDS WITH PIPELINE END MANIFOLDS.

Applied Ocean Research. Volume 46, páginas 94-103, Elsevier Ltd. 2014.

SILVA, A. G. P. DA; ALVES JÚNIOR, C. **A SINTERIZAÇÃO RÁPIDA: SUA APLICAÇÃO, ANÁLISE E RELAÇÃO COM AS TÉCNICAS INOVADORAS DE SINTERIZAÇÃO.** *Cerâmica*, v. 44, p. 225–232, 1 dez. 1998.

MASHL, Stephen J. **POWDER METALLURGY PROCESSING BY HOT ISOSTATIC PRESSING.** *ASM Handbook*, Michigan, v. 7, p. 260-270, 15 set. 2015.