



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES METALÚRGICAS NA VEDAÇÃO DE FLANGES ATRAVÉS DE JUNTAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 316

Renan Oliveira Lacana

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Leonardo Sales Araújo
Coorientadora: Annelise Zeemann do Pinho


Rio de Janeiro
MARÇO\2016

INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES METALÚRGICAS NA VEDAÇÃO DE
FLANGES ATRAVÉS DE JUNTAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 316

Renan Oliveira Lacana

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO
DE ENGENHARIA METALÚRGICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO METALÚRGICO.

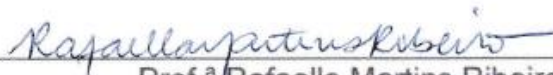
Examinada por:



Prof. Leonardo Sales Araújo, D. Sc.



Prof.ª Annelise Zeemann do Pinho, D. Sc.



Prof.ª Rafaella Martins Ribeiro, D. Sc.



Eng. Maurício Scal, M. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO de 2016

Lacana, Renan Oliveira

Influência das propriedades metalúrgicas na vedação de flanges através de juntas de aço inoxidável AISI 316/ Renan Oliveira Lacana. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2016.

XIII, 59 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Leonardo Sales Araújo e Annelise Zeemann

Projeto de Graduação – UFRJ/POLI/Engenharia Metalúrgica, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 58-59.

1. Aço inoxidável austenítico. 2. Juntas RTJ. 3. Vedação. 4. Flanges. 5. AISI 316.

I. Sales Araújo, Leonardo *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Metalúrgica. III. Influência das propriedades metalúrgicas na vedação de flanges através de juntas de aço inoxidável AISI 316.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, Remy Fernandes Lacana e Elisabete Oliveira Lacana, que com muito esforço me deram a educação e a fibra moral para que eu alcançasse conquistas ao longo de minha vida. Também dedico a minha companheira, Rafaelle Soares Agra, que tanto me deu força e apoiou minhas decisões.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a minha família por me dar apoio e sempre confiar em mim, sem os quais eu não estaria escrevendo este projeto.

Agradeço aos meus professores do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, ao meu orientador, Leonardo Sales Araújo, e a minha coorientadora e idealizadora desse estudo, Annelise Zeemann. Esses são profissionais e professores dedicados que tenho como exemplo a seguir.

Agradeço aos excelentes engenheiros do grupo Teadit: José Carlos Veiga, Luiz Paulo Romano, Roberto Araújo, Nelson Kavanagh, Gustavo Monteiro e ao técnico Rogério, que forneceram os materiais que foram utilizados neste trabalho, dispuseram de seu laboratório, tempo e conhecimento para a elaboração deste projeto.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado ao DEMM/EP/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Metalúrgico.

INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES METALÚRGICAS NA VEDAÇÃO DE FLANGES ATRAVÉS DE JUNTAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 316

Renan Oliveira Lacana

Março/2016

Orientador: Leonardo Sales Araújo

Curso: Engenharia Metalúrgica

As juntas de vedação tipo anel metálico são amplamente utilizadas em instalações industriais na vedação de flanges, em condições de serviço severas, altas pressões e altas temperaturas. Dentre os materiais utilizados para fabricação dessas juntas, encontra-se o aço inoxidável austenítico AISI 316, que pode ter processos de fabricação a partir de chapas laminadas, tubos fundidos por centrifugação ou barras forjadas. Anéis de AISI 316 podem ser utilizados na vedação de flanges de materiais variados, assim como em diferentes projetos, entre os quais navios plataforma tipo FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) onde linhas de aço ao carbono ou de aço inox, utilizando flanges destes materiais e, portanto, de baixa resistência são apertados por parafusos em juntas de AISI 316. Para casos como estes, discute-se sobre os limites de dureza comerciais para os materiais no que tange à possibilidade de amassamento dos canais dos flanges quando na combinação de anéis mais duros ou com dureza próxima à dos flanges. Como é escassa a literatura sobre esse assunto, foi desenvolvido este estudo em anéis de vedação AISI 316 provenientes de processos de fabricação diferentes, fundição por centrifugação, laminação e forjamento, caracterizados por ensaios de tração, metalografia, análise química, dureza, difração de raios-X, e seu comportamento em testes de vedação, assim como a contribuição de diferentes combinações de dureza e material na deformação do anel ou do canal de assentamento no flange, utilizando dimensionamento tridimensional a laser. Verificou-se que em todos os testes houve deformação dos canais dos flanges, exceto para flanges indeformáveis (em aços martensíticos de alta dureza). Observou-se grande influência do tipo de matéria-prima utilizada no desempenho em vedação e na interação com os flanges. Os anéis fabricados de chapas laminadas mostraram-se os mais críticos à integridade dos flanges, mas também foram os que tiveram os melhores resultados em vedação. Constatou-se que apenas garantir dureza máxima do anel e diferenças entre durezas não são suficientes para prevenir danos aos flanges.

Palavras-chave:

1. Aço inoxidável austenítico. 2. Juntas RTJ. 3. Vedação. 4. Flanges. 5. AISI 316.

Abstract of Undergraduate Project presented to DEMM/EP/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Metallurgical Engineer.

INFLUENCE OF THE METALLURGICAL PROPERTIES IN FLANGES SEALING THROUGH AISI 316 STAINLESS STEEL RING JOINTS

Renan Oliveira Lacana

March/2016

Advisor: Leonardo Sales Araújo

Course: Metallurgical Engineering

The metallic ring type joints are widely used in industrial plants for the sealing of flanges operating in severe service conditions, high pressures and temperatures. Among the materials used in these joints, there is the AISI 316 austenitic stainless steel, which can be manufactured from rolled sheets, centrifugally cast pipes and forged bars. AISI 316 ring gaskets can be adopted to seal different flange materials, in different kinds of projects, including FPSO where carbon steel and stainless steel lines, using flanges in these low strength materials, are connected by tightening fasteners through the combination with AISI 316 ring joints. This fact inducted a discussion about the limits of hardness for both materials in respect of the possibility of kneading flange grooves when the combination of ring gasket hardness near or above the flange's groove. As the literature is scarce on this subject, a study was developed on AISI 316 rings gaskets manufactured by different processes - casting, rolling or forging - characterized by tensile tests, microstructural analysis, chemical analysis, hardness, and its behavior in sealing tests as well as the influence of the combination of hardness and materials in the deformation of the ring or the flange's groove by analysis through laser deformation measurements. It was found that in all tests there was deformation of the flanges' groove, except for flanges in martensitic steel. The manufacturing process presented a large influence in the connection behavior during sealing. The rings manufactured from rolled sheets were more critical to the integrity of the flanges but were the best in sealing. It is clear that the maximum hardness level of the ring by itself and minimum hardness differences between flange and ring are not sufficient parameters to prevent flange's damage during tightening and sealing.

Keywords:

1. Austenitic stainless steel. 2. RTJ Gaskets. 3. Sealing. 4. Flanges. 5. AISI 316.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Aços Inoxidáveis	3
2.1.1. Aços inoxidáveis austeníticos	8
2.2. Ligações Flangeadas	13
2.2.1. Flanges	13
2.2.2. Anéis de Vedação	15
2.2.2.1. Fabricação de anéis de vedação de aço inoxidável	16
A. Anéis de tubos fundidos por centrifugação	16
B. Anéis de chapas laminadas	17
C. Anéis de barras forjadas	17
3. Materiais e Métodos	18
3.1. Materiais	18
3.2. Métodos	19
3.2.1. Caracterização Metalúrgica dos Anéis	19
3.2.2. Testes de Vedação e Dimensionamento dos Anéis	21
4. Resultados	25
4.1. Composição química	25
4.2. Análise microestrutural por microscopia ótica	25
4.3. Ensaio de difração de raio-X	32
4.4. Ensaio de tração	33
4.5. Medidas de Dureza	35
4.6. Testes de Vedação	36
4.7. Dimensionamento dos flanges e anéis testados	42
5. Discussão	51
6. Conclusões	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (a) Flange e anel de vedação e (b) ilustração da seção transversal de um anel e o canal de um flange. Adaptado de [3].	2
Figura 2 - Relação entre a taxa de corrosão e a fração de cromo em massa. Adaptado de [7].	4
Figura 3 - Comparação aproximada do sistema Fe-Ni e Fe-Cr sob o ponto de vista de influência na transformação alotrópica do ferro. Adaptado de [7].	5
Figura 4 - Diagrama pseudobinário Fe-Cr-Ni, com teor de Fe fixado em 70%. Adaptado de [12].	10
Figura 5 - Variação das propriedades devido ao trabalho a frio. Adaptado de [14].	12
Figura 6 - Conexão flangeada em trecho de tubulação. Adaptado de [15].	13
Figura 7 - Fotografias do anel B6 como recebido.	18
Figura 8 - Difratoograma apresentando os picos de austenita (γ) e martensita (α'). Adaptado de [13].	20
Figura 9 - Corpo de prova usinado a partir de um anel de vedação para ensaio de tração.	20
Figura 10 - Combinações de testes de vedação.	22
Figura 11 - Desenho em corte do dispositivo de testes de vedação.	23
Figura 12 - Parte superior e inferior do flange e anel (esquerda); conjunto montado (direita).	23
Figura 13 - Analisador de vapores TVA2020 (esquerda) e aparato completo para ensaio de vedação (direita).	24
Figura 14 - Micrografias do anel C5 com aumento nominal de 50x.	26
Figura 15 - Micrografia do anel C5 com aumento nominal de 200x.	26
Figura 16 - Micrografia do anel C6 com aumento nominal de 50x.	27
Figura 17 - Micrografia do anel C6 com aumento nominal de 200x.	27
Figura 18 - Micrografia do anel F5 com aumento nominal de 50x.	28
Figura 19 - Micrografias do anel F5 com aumento nominal de 200x.	28
Figura 20 - Micrografia do anel F6 com aumento nominal de 50x.	29
Figura 21 - Micrografia do anel F6 com aumento nominal de 200x.	29
Figura 22 - Micrografia do anel B5 com aumento nominal de 50x.	30
Figura 23 - Micrografia do anel B5 com 200x de aumento.	30
Figura 24 - Micrografia do anel B6 com aumento nominal de 50x.	31
Figura 25 - Micrografia do anel B6 com aumento nominal de 200x.	31
Figura 26 - Difratoograma do anel de fundido, mostrando picos de austenita.	32

Figura 27 - Difratograma do anel de chapa, mostrando picos de austenita.	32
Figura 28 - Difratograma do anel de barra forjada, mostrando picos de austenita.	33
Figura 29 - Curvas de tração de anéis fabricados de chapas (a), fundidos (b) e barras (c).	34
Figura 30 - Ensaio de Vedação do Anel F1, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).	37
Figura 31 - Ensaio de Vedação do Anel F2, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).	37
Figura 32 - Ensaio de Vedação do Anel F3, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).	37
Figura 33 - Ensaio de Vedação do Anel F4, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).	38
Figura 34 - Ensaio de Vedação do Anel F7, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).	38
Figura 35 - Ensaio de Vedação do Anel F8, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).	38
Figura 36 - Ensaio de Vedação do Anel F9, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).	39
Figura 37 - Ensaio de Vedação do Anel F10, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).	39
Figura 38 - Ensaio de Vedação do Anel C3, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).	39
Figura 39 - Ensaio de Vedação do Anel C4, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).	40
Figura 40 - Ensaio de Vedação do Anel B1, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).	40
Figura 41 - Ensaio de Vedação do Anel B2, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).	40
Figura 42 - Ensaio de Vedação do Anel B3, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).	41
Figura 43 - Ensaio de Vedação do Anel B4, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).	41
Figura 44 - Compilado de informações dos ensaios de estanqueidade, considerando médias e desvios padrão dos anéis duplicados.	41
Figura 45 - Medição do conjunto F1 - MA1.	44
Figura 46 - Medição do conjunto F2 – MA1.	44
Figura 47 - Medição do conjunto F3 – MB1.	45
Figura 48 - Medição do conjunto F4 – MB2.	45
Figura 49 - Medição do conjunto F7 – MC1-1.	46
Figura 50 - Medição do conjunto F8 – MC1-2.	46
Figura 51 - Medição apenas do flange MB1-2, pois o resultado do anel F9 não ficou pronto em tempo para este projeto.	47
Figura 52 - Medição do conjunto F10 - MC2-2.	47
Figura 53 - Medição do conjunto C3 – MB3.	48
Figura 54 - Medição do conjunto C4 – MB4.	48

Figura 55 - Medição do conjunto B1 - MA1.	49
Figura 56 - Medição apenas do flange MA1, pois o resultado do anel B2 não ficou pronto em tempo para este projeto.	49
Figura 57 - Medição do conjunto B3 – MB5.	50
Figura 58 - Medição do conjunto B4 – MB6.	50
Figura 59 - Curvas de ensaios de tração sobrepostas.	52
Figura 60 - Gráfico esquemático de dureza dos anéis x dureza dos flanges, apresentando simbologia para comparar níveis de deformação em cada caso.	52
Figura 61 - Gráfico de aperto para alcançar a estanqueidade x deformação nos anéis.....	55
Figura 62 - Gráfico de aperto para alcançar a estanqueidade x deformações	55
Figura 63 - Gráfico de aperto para alcançar a estanqueidade x diferença de durezas entre anéis e flanges.	56
Figura 64 - Diferença de limite de escoamento x aperto para alcançar a estanqueidade	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições recomendáveis para utilização de aços especiais. Adaptado de [2].

Tabela 2 - Efeito de vários elementos sobre a liga Fe-C. Adaptado de [8].

Tabela 3 - Composição química de aços inoxidáveis fundidos ou recozidos. Adaptado de [5].

Tabela 4 - Valores de propriedades mecânicas em função da intensidade de encruamento do aço inoxidável tipo AISI 301. Adaptado de [7].

Tabela 5 – Limites de dureza mínima recomendáveis para flanges. Adaptado de [2].

Tabela 6 – Limites de dureza máxima para anéis de vedação. Adaptado de [16].

Tabela 7 – Composição química dos anéis.

Tabela 8 – Valores das propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração.

Tabela 9 - Dureza Rockwell B dos anéis X5 e X6.

Tabela 10 – Durezas de todos os anéis de vedação e flanges.

Tabela 11 – Compilado de dureza e deformação dos conjuntos testados.

Tabela 12 – Conjunto de valores medidos e estimados para geração de gráficos.

1. Introdução

É indiscutível como a indústria petrolífera tem papel fundamental no desenvolvimento de um país, especialmente o Brasil. Seus diversos produtos tornaram-se essenciais para evolução das atividades econômicas, sociais, de transporte e energéticas. Por se tratar de mercado que move investimentos vultosos e possui matérias-primas potencialmente perigosas, é de se esperar grande preocupação com a segurança e o bom funcionamento de suas instalações industriais.

A produção em uma indústria de processamento se dá em regime contínuo, lidando com fluidos de mais alto risco como líquidos inflamáveis, tóxicos, explosivos, a altas temperaturas e pressões. Logo, o bom projeto de tubulações tem como principal função a garantia de segurança de seus operadores, instalações, equipamentos, e como papel secundário, a responsabilidade de manter em operação seus equipamentos, pois qualquer problema causando a paralização resultaria em interferências dispendiosas em toda a cadeia de processamento [1].

Dentre os diversos componentes de sistemas de tubulação, existe um amplamente utilizado para ligações entre equipamentos, que é a conexão flangeada, composta por dois flanges, parafusos tipo estojo, porcas e junta de vedação. É bastante usada para conexão de tubos com válvulas e equipamentos, quando esses necessitam de fácil desmontagem. Os flanges são componentes que exigem cuidado especial, pois além de serem peças caras, pesadas e volumosas, constituem em geral a parte mais crítica de uma linha de tubulação por serem mais susceptíveis à vazamentos [2].

As juntas de vedação têm papel fundamental para garantir a segurança dessas conexões, sendo as mesmas fornecidas nos mais diversos materiais (metálicos e não-metálicos) e formatos. Existe uma que exige destaque, a junta metálica tipo anel (RTJ - *ring type joint*), utilizada para serviços severos, altas pressões e temperaturas (de um modo geral para qualquer serviço acima de 550°C). Quando montada, fica assentada em uma cavidade de seção transversal trapezoidal na face do flange tipo RTJ (Figura 1). As juntas tipo anel metálicas apresentam melhor desempenho em vedação para o mesmo nível de aperto pelos parafusos

quando comparada com outras juntas, isso não se deve somente a tensão gerada pela geometria da cunha na cavidade do flange, como também a ação da pressão interna comprimindo a junta contra as paredes na sede [2].

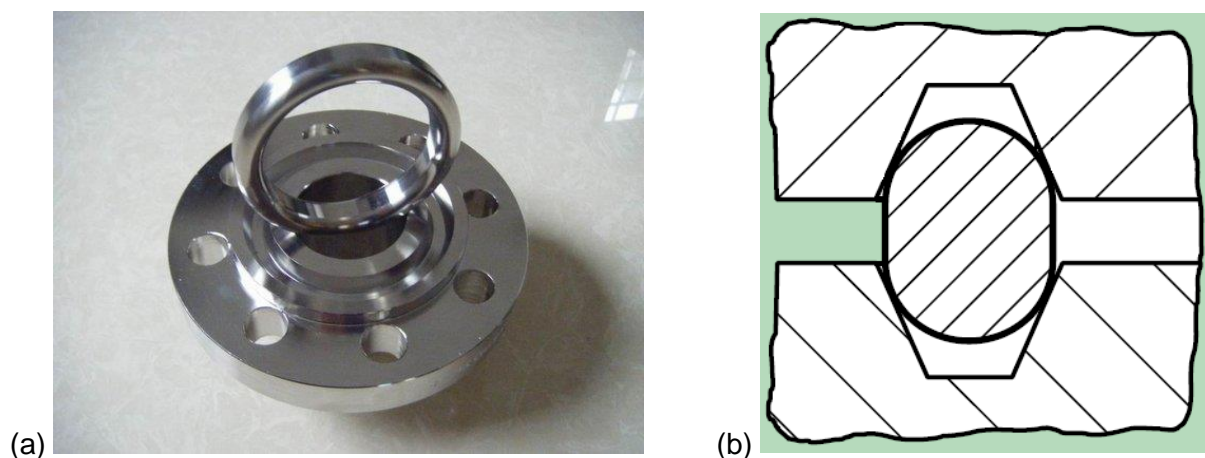


Figura 1 – (a) Flange e anel de vedação e (b) ilustração da seção transversal de um anel e o canal de um flange. Adaptado de [3].

O torque aplicado pelos parafusos é responsável pela elevação da tensão aplicada à junta pela parede do canal do flange, levando a mesma ao escoamento e preenchimento de rugosidades que permitiriam vazamentos. Como há intensa tensão no contato das peças, é indicado que haja menor dureza superficial na junta em relação ao canal de assentamento para que esta não danifique o flange nem dificulte vedações futuras no caso de desmontagens [4].

Um caso particular encontrado em projetos de tubulações de navios-plataforma FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*), instigou o estudo deste trabalho, no qual uma combinação de junta anel de aço inoxidável AISI 316, que possui dureza comercialmente encontrada na faixa de 130 HB à 160 HB, é montado com flanges de aço carbono de dureza mínima 150 HB, formando assim um intervalo de dureza no qual se pode ter o anel com dureza igual ou superior à do flange.

Este trabalho tem por objetivo avaliar se existe influência na garantia de vedação e na integridade dos flanges quando os anéis são fabricados a partir de matérias-primas provenientes de processos metalúrgicos diferentes (tubos fundidos por centrifugação, chapas laminadas e barras forjadas); além de ratificar ou confrontar os requisitos de dureza dos anéis para evitar falha no uso dessas juntas.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Aços Inoxidáveis

Conexões flangeadas em linhas de alta pressão e/ou alta temperatura exigem anéis de vedação cujo esmagamento garante a vedação da linha e integridade do sistema. Estes anéis estão sempre molhados pelo fluido interno (e pelo fluido externo, caso exista) e não podem sofrer degradação durante o tempo em que estão em operação no sistema, embora sejam descartáveis e trocados a cada desmontagem e abertura dos flanges. Dessa forma precisam sempre apresentar resistência à corrosão similar ou superior à do material da linha e é usual que sejam de ligas resistentes à corrosão, embora em condições de teste sejam utilizados anéis de aço ao carbono, pois estes são descartados após o teste.

Além da resistência à corrosão que os anéis de vedação em geral requerem são também exigidas características de fácil amassamento e isto significa que o tipo de microestrutura do anel também é fundamental para assegurar seu escoamento sem causar danos aos flanges. Dessa forma é importante conhecer um pouco sobre os aços especiais.

Os aços especiais, também conhecidos como aços-liga pois apresentam elementos de liga que lhe permitem obter propriedades diferenciadas, tem custo bem superior ao de aços-carbono, que se justifica nas condições apresentadas na Tabela 1 [2].

Tabela 1 – Condições recomendáveis para utilização de aços especiais. Adaptado de [2].

Altas temperaturas	Temperaturas acima dos limites de uso dos aços-carbono, ou mesmo dentro desses limites, quando for exigida maior resistência mecânica, maior resistência à fluência, ou maior resistência à corrosão.
Baixas temperaturas	Temperaturas inferiores a -45°C, devido à possibilidade de fraturas frágeis com o aço-carbono.
Alta corrosão	Serviços com fluidos corrosivos, mesmo quando dentro da faixa de temperaturas de emprego dos aços-carbono. De um modo geral, os aços-liga e inoxidáveis têm melhores qualidades de resistência à corrosão do que os aços-carbono. Existem, entretanto, numerosos casos de exceção: água salgada, por exemplo, destrói a maioria dos aços especiais tão rapidamente como os aços-carbono.
Exigência de não-contaminação	Serviços para os quais não se possa admitir a contaminação do fluido circulante (produtos alimentares e farmacêuticos, por exemplo). A corrosão, ainda que só seja capaz de destruir o material do tubo depois de muito tempo, pode causar a contaminação do fluido circulante quando os resíduos da corrosão são carregados pela corrente fluida. Por essa razão, nos casos em que não possa haver contaminação, empregam-se muitas vezes os aços especiais, embora do ponto de vista propriamente da corrosão não fossem necessários.
Segurança	Serviços com fluidos perigosos (em temperatura muito elevada, inflamáveis, tóxicos, explosivos, etc.), quando for exigido o máximo de segurança contra possíveis vazamentos e acidentes. Também nesses casos, estritamente devido à corrosão, não seriam normalmente necessários os aços especiais.

Entre os aços especiais, os aços inoxidáveis são os mais largamente utilizados, principalmente as classes dos austeníticos (não magnéticos), que contém aproximadamente 16% a 26% de Cr e 6% a 22% de Ni [2].

Os aços inoxidáveis apresentam resistência à corrosão em diversos tipos de ambientes (atmosférico, muitos gases industriais e químicos) e resistência à oxidação desde temperaturas criogênicas à elevadas e boa soldabilidade [5].

As propriedades de resistência à corrosão são obtidas basicamente pela quantidade de cromo pois o mesmo, quando em proporção superior a 12%, como é apresentado na Figura 2, estabiliza a formação de uma camada passiva na superfície do metal, atuando esta como barreira física para a reação com o meio corrosivo. Para que haja a proteção, essa camada fina e aderente deve ser indissolúvel e impermeável [6].

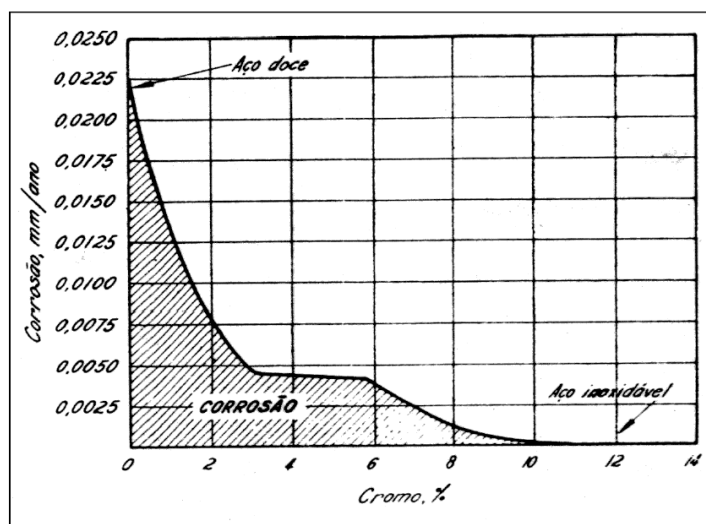


Figura 2 - Relação entre a taxa de corrosão e a fração de cromo em massa. Adaptado de [7].

As propriedades mecânicas dependem ainda do tipo de microestrutura, promovido pela composição química, basicamente cromo, carbono, níquel, manganês, molibdênio e nitrogênio.

Os aços inoxidáveis podem ser divididos em quatro grandes grupos quanto à sua estrutura cristalina: austeníticos, ferríticos, martensíticos e duplex. Os austeníticos são os mais empregados na fabricação de anéis de vedação, portanto a análise será aprofundada nos mesmos e na diferença de microestrutura provenientes dos processos de fabricação como fundidos, barras e chapas laminadas.

Os aços inoxidáveis apresentam essencialmente, dependendo da proporção dos elementos de liga e da temperatura, as fases: *alfa* (ferrita α - cúbica de corpo centrado), *gama* (austenita γ - cúbica de face centrada) ou *delta* (ferrita δ - cúbica de corpo centrado). Os elementos de liga podem ser classificados em α -formadores, quando aumentam o campo da ferrita no diagrama de equilíbrio, ou γ -formadores, quando ampliam o campo da austenita [8].

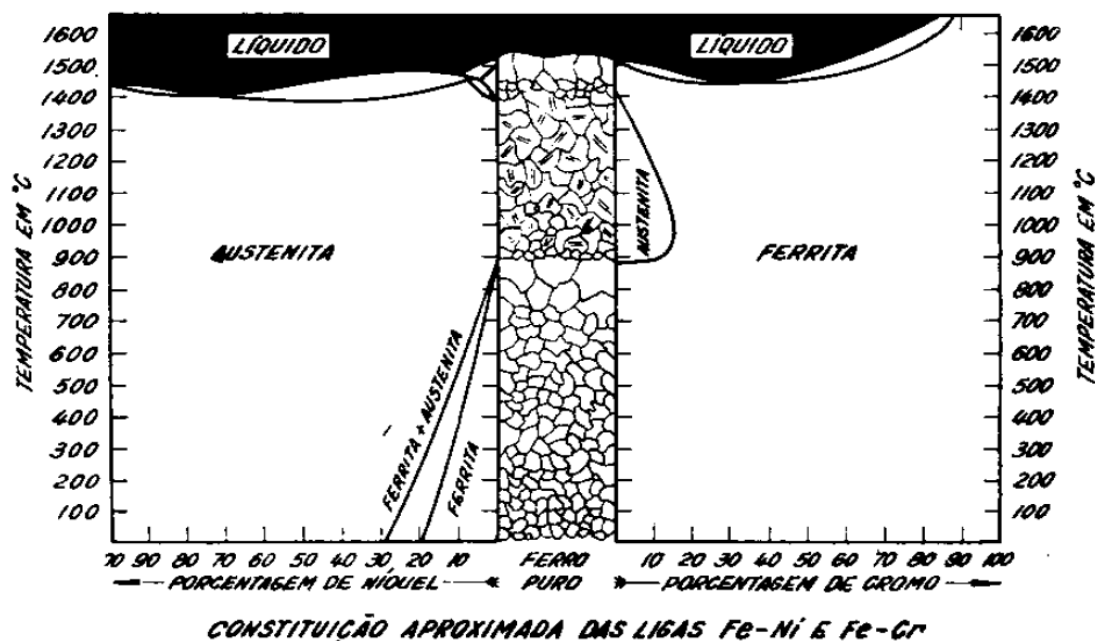


Figura 3 - Comparação aproximada do sistema Fe-Ni e Fe-Cr sob o ponto de vista de influência na transformação alotrópica do ferro. Adaptado de [7].

Como pode-se observar no diagrama de constituição aproximada dos sistemas Fe-Ni e Fe-Cr apresentados na Figura 3, o níquel é estabilizador da austenita assim como o cromo é da ferrita. Contudo, a influência do níquel é notadamente mais efetiva, de forma que todos os aços inoxidáveis, mesmo contendo fração superior a 16% de cromo, para baixos teores de C (γ - formador), são considerados totalmente austeníticos para teores de Ni da ordem de 8% p. Como exemplo, o aço AISI 304 (18%Cr 8%Ni 0,08%C) é totalmente austenítico. Deve-se observar que outros elementos também participam da estabilização de determinadas fases (assim como exemplificado na Tabela 2), mas não estão presentes em quantidade suficiente para superar Cr e Ni. Vale ressaltar que o carbono é estabilizador da austenita. O balanço de composição Cr-Ni pode originar microestruturas totalmente ferríticas, totalmente austeníticas ou austeno-ferríticas [8, 9].

Tabela 2 - Efeito de vários elementos sobre a liga Fe-C. Adaptado de [8].

Elemento	Efeito sobre o campo austenítico
cromo	contração
molibdênio	contração
níquel	expansão
manganês	expansão
carbono	expansão
silício	contração

Os elementos de liga e residuais podem alterar o tipo de estrutura dependendo de seu efeito austenitizante ou ferritizantes, além de que podem ser formadores de carbonetos ou permanecer em solução na rede como substitucionais ou intersticiais. Cobre, nitrogênio, cobalto, níquel, manganês, alumínio e carbono são conhecidos como austenitizantes, pois promovem a formação e estabilização da austenita. Por outro lado, cromo, molibdênio, silício, nióbio, vanádio e titânio, são ferritizantes, promovendo equilíbrio para formação de ferrita. Titânio, nióbio, tungstênio, vanádio, tântalo são formadores de carbonetos. Esses últimos, quando não se combinam com o carbono, atuam como estabilizadores da ferrita, permanecendo em solução sólida. Hidrogênio e oxigênio, por seu pequeno tamanho atômico, permanecem intersticiais [9].

Como os elementos de liga podem alterar a estrutura e conseqüentemente as propriedades de resistência à corrosão e de resistência mecânica, seu controle na liga é muito importante. Algumas influências de elementos de liga em aços inoxidáveis estão apresentadas a seguir.

Cobre

O cobre é um elemento austenitizante, assim como o níquel, porém é duas vezes mais efetivo na redução da taxa de encruamento para aços tipo 301. Já nos tipos 316 e 317, a adição de cobre eleva a resistência à corrosão reforçada pelo efeito do molibdênio, elemento típico desses tipos de aço. O cobre é vantajosamente utilizado na indústria metalúrgica, pois permite substituição de parte do volume de níquel a ser adicionado [9].

Cobalto

Semelhante ao níquel, o cobalto também é um elemento austenitizante, e como elemento residual até 0,05% não apresenta problemas no processo de laminação. Já foi observada que a presença de fração em massa de 1% no aço inoxidável ao molibdênio tipo 316, favoreceu as propriedades mecânicas, a resistência à corrosão e a soldabilidade [9].

Nitrogênio

O nitrogênio é um potente estabilizador da austenita, e também promove aumento do limite de escoamento nos aços inoxidáveis tipo 201, 304L e 316L. Por outro lado, a redução da quantidade de nitrogênio eleva sensivelmente a capacidade de encruamento por trabalho mecânico. Não se observam problemas superficiais ou com a laminação à frio para percentuais até 0,20% em massa [9].

Silício

O silício é um elemento presente em todos os tipos de aços inoxidáveis, presente em no máximo 1% em massa, fortemente ferritizante e com capacidade de elevação da resistência no material. Não apresenta efeitos sobre a laminação e na superfície do material, quando dentro da faixa de composição padrão. Em aços com alto nível de silício na composição, nota-se sensível elevação da resistência mecânica [9].

Molibdênio

Molibdênio é um elemento padrão para os aços tipo 316 e 317, sendo esses chamados de aços inoxidáveis ao molibdênio, representando 3 a 4 % em massa. Esse elemento possui duplo efeito, pois além de estabilizador da ferrita, também atua como formador de carbonetos. Esse segundo papel do molibdênio confere aos graus 316 e 317 maior resistência à corrosão por pite, sendo dessa forma mais resistentes em ambientes com cloretos ou haletos [9].

Alumínio

O alumínio é normalmente utilizado nos processos de desoxidação, por esse motivo é muito comum a sua presença residual na maioria dos aços. Esse elemento atua como estabilizador da austenita, e é intencionalmente adicionado na composição dos aços inoxidáveis

endurecíveis por precipitação, além de ser usado como elemento, conjugado com outros, para melhorar a usinabilidade [9].

Fósforo

O fósforo é um elemento que deve ser controlado na composição, pois possui efeito adverso no trabalho à quente dos aços inoxidáveis austeníticos.

Titânio

O titânio é utilizado para evitar a precipitação de carboneto de cromo nos aços inoxidáveis austeníticos (como exemplo, o tipo 321), pois ele é forte formador de carbonetos. Inibe a perda de cromo em solução sólida especialmente na região próxima aos contornos de grão, elevando a resistência a corrosão dos aços. Além de atuar como formador de carbonetos, o titânio é capaz de se ligar ao nitrogênio e ao oxigênio, sendo também forte estabilizador da ferrita [9].

Enxofre

O enxofre pode ser benéfico quando se deseja boa usinabilidade, pois os compostos formados permitem o fácil desprendimento das tiras de material retirado e ajudam com a lubrificação, porém os aços de corte fácil apresentam problemas de uso em meios muito agressivos devido à facilidade na formação de pites.

2.1.1. Aços inoxidáveis austeníticos

O aço inoxidável austenítico, liga Fe-Cr-Ni, é a mais utilizada e representa cerca de 65% a 70% em peso [8]. Sua principal característica é a manutenção da estrutura CFC (cúbica de face centrada) por toda a faixa de temperaturas [10].

Essa posição de destaque é devido a alta versatilidade de fabricação, boa soldabilidade, excelente resistência à corrosão e considerável variedade de propriedades dependendo da composição química, provendo muitos materiais úteis para diferentes aplicações [8].

Os aços inoxidáveis austeníticos com composição apresentando cromo e níquel, são classificados como pertencentes à série 300 e aqueles que apresentam cromo, níquel e manganês à série 200, segundo a ASTM (*American Society for Testing and Materials*). Existem ainda alguns casos que não são classificados em nenhum dos dois grupos. A adição de níquel

melhora consideravelmente a resistência à corrosão e à oxidação a altas temperaturas, isso fica mais evidente quando se analisa a restauração da película passivadora de um aço Cr-Ni, pois essa se refaz muito mais rápido que um aço somente ao Cr [7].

Cada grupo apresenta características e propriedades diferentes, mas algumas propriedades são comuns a todos os austeníticos. Podem ser endurecidos por trabalho a frio, mas não por tratamento térmico pois já apresentam fase totalmente austenítica. São essencialmente não-magnéticos, mas podem ser levemente magnetizados por trabalho à frio. No estado recozido (ou solubilizado) apresentam alto grau de conformabilidade [5].

Os aços pertencentes a série 300 podem ser bastante diferentes uns dos outros. Dentre eles os mais utilizados são AISI 304 e 302, pois apresentam melhor estabilidade e resistência à corrosão melhorada. A adição de molibdênio ao tipo 304, representa o grupo 316 e 317, aumentando assim a resistência mecânica e à corrosão em elevadas temperaturas [8].

A Tabela 3 apresenta composições nominais típicas de alguns dos aços inoxidáveis mais utilizados na fabricação de anéis de vedação RTJ.

Tabela 3 - Composição química de aços inoxidáveis fundidos ou recozidos. Adaptado de [5].

UNS	Tipo	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Outros
S30400	304	0,08	2,00	0,045	0,030	1,00	18,00-20,00	8,00-10,00	N 0,10
S30403	304L	0,03	2,00	0,045	0,030	1,00	18,00-20,00	8,00-10,00	N 0,10
S31600	316	0,08	2,00	0,045	0,030	0,75	16,00-18,00	10,00-14,00	Mo 2,00-3,00 N 0,10
S31603	316L	0,03	2,00	0,045	0,030	0,75	16,00-18,00	10,00-14,00	Mo 2,00-3,00 N 0,10
S32100	321	0,08	2,00	0,045	0,030	0,75	17,00-19,00	9,00-12,00	Ti 5x(C+N)-0,70 N 0,10
S34700	347	0,08	2,00	0,045	0,030	0,75	17,00-19,00	9,00-13,00	Cb 10xC -1,00

Uma microestrutura apropriada é obtida através de cuidadoso controle do balanço de elementos, tempo e velocidade de resfriamento e tratamento térmico pós-solidificação (quando aplicável). Esse cuidado é especialmente importante quando se tratam de componentes que serão soldados ou trabalharão em altas temperaturas, pois existe a possibilidade de transformações que alteram as propriedades mecânicas e de corrosão [11].

Para composições na série AISI 300 (16 a 19Cr-12Ni) é prevista a entrada no campo $\alpha + \gamma$, para o resfriamento a partir do aço líquido assim como apresentado na Figura 4. Nas ligas dessa série observa-se normalmente a presença de ferrita de alta temperatura (ferrita delta - δ) como

segunda fase, onde sua fração volumétrica é dependente da composição, do grau de homogeneidade e do quão próximo do equilíbrio foi seu histórico térmico - especialmente durante o resfriamento [8].

Os aços inoxidáveis austeníticos são formulados e termodinamicamente planejados para apresentarem apenas fase austenita. Porém dependendo da fração volumétrica de agentes estabilizadores da ferrita/ estabilizadores da austenita, pode haver a presença significativa de ferrita δ como evidenciado pelo diagrama pseudobinário da Figura 4 [12].

A presença de ferrita em aços inoxidáveis austeníticos conformados mecanicamente e solubilizados é inferior a 3%. Já nos fundidos é possível a presença entre 5% a 20%. A ferrita δ resultante pode ser vantajosa ou deletéria dependendo da aplicação. Geralmente é deletéria, pois essa fase, além de possuir maior solubilidade para contaminantes como S e P (elementos críticos para trinca à quente), pode sofrer transformações em intermetálicos (principalmente fase σ) negativos para as propriedades desejadas [12]. Além disso, a maior fração de ferrita pode favorecer o aumento da tensão limite de escoamento e de resistência.

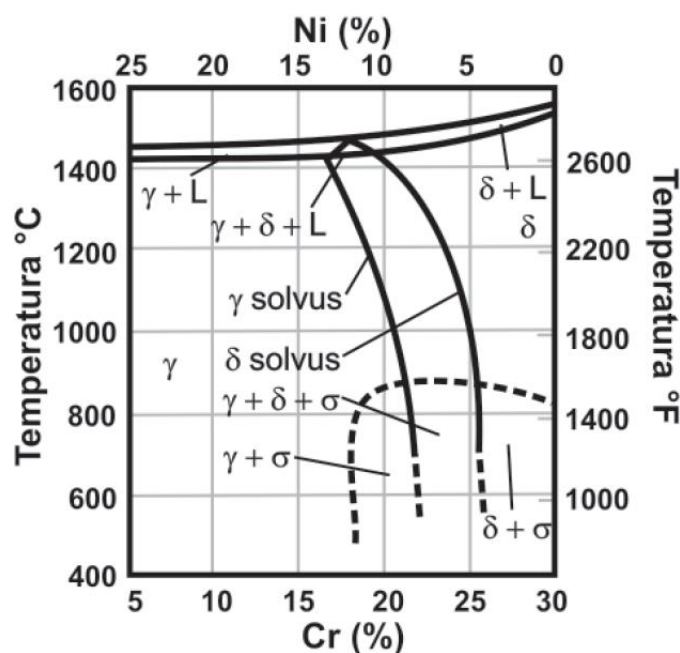


Figura 4 - Diagrama pseudobinário Fe-Cr-Ni, com teor de Fe fixado em 70%. Adaptado de [12].

Existe um fenômeno que pode ocorrer nos aços inoxidáveis austeníticos que é a formação de martensita induzida por deformação. Essa transformação pode ocorrer em temperatura ambiente e a quantidade em volume depende de variáveis como composição química,

temperatura, deformação plástica, estado de tensões, modo de deformação, tamanho de grão, orientação de grãos, etc. [13].

A transformação, que ocorre a partir da austenita, pode se dar em duas vias:



A transformação direta de $\gamma \rightarrow \alpha'$ através de reações com linhas de discordância é possível, assim como a formação de martensita ϵ se formar para baixas temperaturas (-50°C). Essas formações de martensita mesmo parcial na matriz γ causa mudanças nas propriedades físicas do material promovendo endurecimento além do gerado pelo encruamento [13].

Os aços inoxidáveis austeníticos quando encruados apresentam endurecimento muito superior a outros aços igualmente deformados. Esse aumento expressivo está associado à intensa capacidade de encruamento por trabalho à frio — facilitado pela baixa energia de falha de empilhamento (EFE) que dificulta o reagrupamento de linhas de discordância dissociadas e a realização de deslizamento cruzado, exigindo assim maiores tensões externas para a deformação [7], além da possibilidade de ocorrência do fenômeno de formação de martensita induzida por deformação.

Um aço 18-8 estirado à frio pode chegar a um limite de resistência à tração da ordem de 250 kgf/mm² (2450 MPa) com uma deformação que em um aço comum não produziria mais que 140 kgf/mm² (1370MPa) [7]. Aços inoxidáveis trabalhados à frio são tão importantes que existem classificações dependendo do quanto eles podem ser endurecidos por encruamento. Essa classificação varia desde o recozido (mole) até o totalmente encruado (duro).

A Tabela 4 apresenta essa classificação para um aço AISI 301 [7].

Tabela 4 - Valores de propriedades mecânicas em função da intensidade de encruamento do aço inoxidável tipo AISI 301. Adaptado de [7].

Grau do encruamento	Redução de secção aproximada (%)	Limite de resistência à tração		Limite de escoamento		Alongamento mínimo, em 25mm (%)
		kgf/mm ²	MPa	kgf/mm ²	MPa	
1/4 duro	10 a 15	88	860	53	520	25
1/2 duro	20	105	1030	77	760	15
3/4 duro	30	123	1210	95	930	10
duro	40	130	1280	98	960	8

Os valores de alongamento são para espessura superior a 0,38 mm.

Uma das principais características dos metais é a ocorrência de encruamento quando são submetidos à deformação plástica, esse fenômeno é identificado quando ocorre o aumento da tensão cisalhante necessária para produzir deslizamento de discordâncias conforme aumenta-se a deformação do metal. O endurecimento é resultado de interações entre discordâncias com barreiras que impeçam a sua propagação, como precipitados, partículas de segunda fase, átomos de soluto, outras discordâncias, etc. Ocorre também o aumento da densidade de discordâncias com a deformação, esse aumento potencializa os efeitos de interações de bloqueio. A deformação que eleva o número de discordâncias bloqueadas provoca aumento das tensões internas que se opõem a novas tensões externas aplicadas [14].

É importante salientar que só se considera trabalho de deformação a frio, que causa os efeitos mencionados, quando a deformação plástica ocorre em temperatura e tempo determinados tal que não possibilitem a recristalização [14].

A partir da curva tensão x deformação real, é possível obter o expoente de encruamento do metal. A Figura 5 apresenta o típico comportamento da resistência e da ductilidade com o aumento do trabalho a frio.

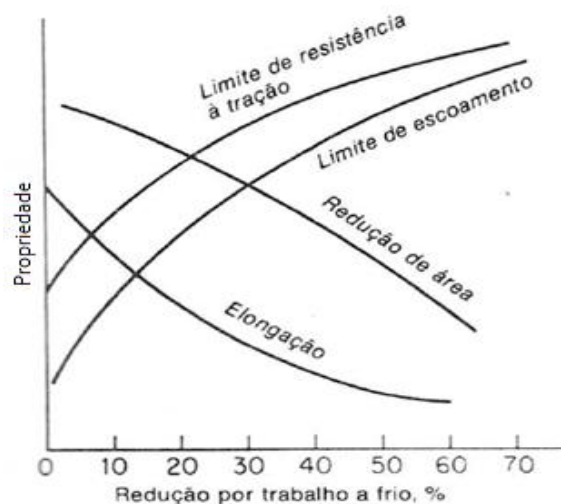


Figura 5 - Variação das propriedades devido ao trabalho a frio. Adaptado de [14].

O expoente de encruamento é uma constante associada ao material que permite avaliar a capacidade de conformação do material. Quanto maior o valor de “n”, que é sempre inferior a um, mais encruado o material pode estar para a mesma tensão aplicada e maior é a sua capacidade de ser conformado sem redução de espessura ou empescoamento e ruptura [14].

2.2. Ligações Flangeadas

2.2.1. Flanges

Em tubulações é muito comum a utilização de flanges (Figura 6), principalmente para tubos de 2 polegadas ou mais de diâmetro nominal. Por serem de fácil desmontagem, são empregados em dois casos principais: (1) ligação de tubos a equipamentos (tanques, bombas, filtros, etc.), válvulas, instrumentos; e (2) ligação direta entre trechos de tubos. O arranjo dessas conexões é composto por dois flanges, uma junta e um jogo de parafusos tipo estojo, cuja quantidade depende da classe de pressão e diâmetro nominal.

É sempre necessário o controle do uso de conexões flangeadas que devem ser empregadas apenas quando estritamente necessário, pois são componentes caros que elevam o peso que deverá ser suportado, além de serem geralmente os pontos mais susceptíveis à vazamentos [2].



Figura 6 - Conexão flangeada em trecho de tubulação. Adaptado de [15].

Os flanges podem ser encontrados em diversos tipos de materiais, como aço-carbono, aço-liga, aço inoxidável, ligas de níquel, PVC, CPVC, resina reforçada com fibra de vidro, entre outros. Seus tipos podem ser: integral, de pescoço, solto, sobreposto, de encaixe, rosqueado, cego e flange para junta tipo anel. O faceamento, ou seja, a geometria da face dos flanges, pode ser do tipo macho e fêmea, com virola, com ressalto, plana ou para junta anel.

No caso dos flanges com juntas anel, a face do flange possui uma cavidade circular de seção transversal trapezoidal onde se encaixa o anel de vedação, podendo este ter seção transversal oval ou trapezoidal. A vedação é a melhor obtida para mesmo grau de aperto dos parafusos, onde além da ação de cunha do anel na cavidade do flange, atuam pressões internas pelo fluido empurrando o anel contra a parede no flange [2].

Cabe ressaltar que a carga de aperto das juntas depende do número de fixadores utilizados, que por sua vez depende da classe de pressão do flange. Linhas de pressões mais elevadas utilizam flanges que requerem maior quantidade de parafusos ou parafusos de maiores diâmetros, para suportar as maiores pressões sem sofrer vazamento.

Para linhas em plantas de processo, cujos materiais atendem a normas ASME, são selecionados flanges cujo material precisa ser resistente à agressividade dos fluidos e portanto existem flanges em aços ao carbono, para fluidos sem agressividade, e flanges em aço inox, para fluidos corrosivos. Existem também flanges em aço CrMo ou em ligas de níquel, mas estes tendem a ser mais duros e apresentam menores problemas de amassamento no canal de assentamento dos anéis, quando se faz o aperto.

Os materiais dos flanges têm propriedades conforme as normas ASTM mas para que o aperto na região dos anéis seja efetivo existem durezas mínimas recomendáveis para os flanges, como as apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Limites de dureza mínima recomendáveis para flanges. Adaptado de [2].

AÇO-CARBONO	120 HB
AÇOS INOXIDÁVEIS TIPOS: 304L E 316L	140 HB

O problema é que estas são recomendações adicionais ao padrão oferecido pelo mercado, o que eleva o custo dos flanges, sendo por isso tão importante que os anéis sejam o mais macio possível para não danificar os flanges, principalmente quando houver serviços severos, de altas pressões (em geral, classes #600 ou maiores) e temperaturas, e de modo geral para temperaturas acima de 550°C [2].

2.2.2. Anéis de Vedação

Item principal estudado neste projeto, a junta de vedação é utilizada em qualquer ligação flangeada, sendo responsável pela estanqueidade do sistema quando comprimida pelo aperto dos parafusos. Porém, quando em serviço, a junta deve resistir às variações de temperaturas e corrosividade dos fluidos passantes (e por isso em geral se utilizam materiais resistentes à corrosão), e sobretudo deve ser resistente o suficiente para não falhar quando submetida à pressão interna do tubo que tenta separar os flanges, pressão essa que gera esforço cisalhante radialmente, lembrando que quanto maior a pressão interna, maior será o aperto dos parafusos o que implica maior tensão aplicada sobre a junta [2].

Se por um lado é requerida boa resistência para suportar as pressões, por outro é necessária suficiente capacidade de deformação plástica de forma a preencher as irregularidades superficiais do canal [2].

Segundo a norma API 6A, os anéis de vedação podem ser fabricados a partir forjados trabalhados à quente, tubos ou anéis laminados, barras ou placas laminadas e soldadas e tratadas termicamente. Também podem ser utilizados fundidos por centrifugação. Além disso, a norma indica que a composição química deve ser especificada pelo fornecedor e devem ser respeitados os limites de dureza máxima conforme a Tabela 6 [16]. Para uso em classes de pressão um pouco menores os anéis fornecidos pelo ASME B16.20 [17] tem exatamente os mesmos requisitos de dureza.

Tabela 6 – Limites de dureza máxima para anéis de vedação. Adaptado de [16].

Material	Dureza Máxima (HRB)
Aços carbono e Aços baixa liga	68
AÇOS INOXIDÁVEIS	83
Ligas de níquel UNS N08825	92

O limite de dureza para aços inoxidáveis é de no máximo 83 HRB (Rockwell B), que equivale a 160 HB (Brinell), independente do tipo e grau de aço inoxidável, embora somente sejam utilizados os aços inoxidáveis austeníticos. Os mais usuais são o AISI 304 e o AISI 316, com molibdênio para conferir maior resistência à corrosão por pites, embora no trabalho a quente podem ser utilizados aços estabilizados como o AISI 321 ou o AISI 347.

2.2.2.1. Fabricação de anéis de vedação de aço inoxidável

Os anéis de vedação metálicos podem ser fabricados a partir de matérias-primas como chapas laminadas, tubos fundidos por centrifugação ou barras forjadas, de acordo com o diâmetro nominal que se deseja. Esta escolha de matéria-prima é feita pelo fornecedor e visa reduzir o trabalho e a quantidade de metal perdido na usinagem.

Os requisitos para fornecimento destes anéis envolvem apenas enquadrar o material pela sua composição química, que no caso dos anéis de aço inoxidável austenítico tipo AISI 316, não requer especificamente que o aço tenha um grau de baixo carbono (tipo L por exemplo), promover o tratamento térmico de solubilização (que neste caso assegura que não exista a precipitação de carbonetos com redução da resistência à corrosão), e assegurar que a dureza do anel, medida em sua face, esteja inferior à 83HRB ou 160 HB.

Não existem recomendações específicas de se utilizar diferentes tipos de matérias-primas, nem de mencionar nos certificados a forma como foi fabricado o anel.

A. Anéis de tubos fundidos por centrifugação

Os anéis podem ser cortados e usinados a partir de seções de um tubo produzido via fundição por centrifugação. Existem duas formas básicas de fundição por centrifugação: rotação em eixo horizontal e rotação em eixo vertical, ambos envolvem deposição de metal fundido em um molde que gira rapidamente. A seleção entre estes dois tipos de processos depende da razão L/D (Comprimento/Diâmetro) e espessura de parede [18].

Processos de fundição por centrifugação apresentam boa qualidade e reprodutibilidade pois, devido à combinação da solidificação direcional com a força centrífuga, as inclusões não-metálicas são levadas para a face interna ou externa dependendo da diferença de densidade entre as mesmas e o metal fundido, fazendo com que possíveis defeitos de micro contração e porosidade interdendríticas fiquem concentrados próximo ao furo central. Como as peças sofrem usinagem das superfícies após a fundição, esses defeitos são removidos com a usinagem. Dessa forma, a probabilidade de defeitos internos é muito reduzida [18].

B. Anéis de chapas laminadas

Estes anéis são cortados e usinados a partir de chapas laminadas à quente, solubilizadas e decapadas (acabamento N°1). Em geral, este é o método que gera maior desperdício de metal para sucata, logo é mais aplicado para pequenos diâmetros. A microestrutura desse tipo de aço é formada por grãos austeníticos com maclas e pequena quantidade de ferrita delta. Devido à textura gerada pela direção de laminação, o anel não apresenta mesma microestrutura radialmente, logo pode apresentar alguma diferença de propriedades ao longo do anel [19]. Chapas laminadas à quente e solubilizadas apresentam menor tamanho de grão quando comparadas aos fundidos e por isso suas propriedades de tensão limite de escoamento e tensão limite de resistência tendem a ser maiores. Para anéis de grandes diâmetros podem ser utilizadas chapas laminadas conformadas e soldadas, desde que posteriormente sejam tratadas termicamente.

C. Anéis de barras forjadas

Os anéis fabricados a partir de barras forjadas e trepanadas são cortados em discos e usinados para chegar a forma final. Esses apresentam menor desperdício de metal que as chapas cortadas e não possuem diferença de microestrutura radialmente. A microestrutura desse tipo de aço é formada por grão austeníticos com maclas e ferrita delta [20].

3. Materiais e Métodos

3.1. Materiais

Os materiais deste trabalho correspondem a anéis na configuração R-16 oval, em aço inoxidável austenítico tipo AISI 316, que atendem ao ASME B16.20, para linhas de diâmetro nominal de uma polegada, classes de pressão: 300, 600, 1500 e 2500. Na Figura 7, está ilustrado sua forma e identificação.



Figura 7 - Fotografias do anel B6 como recebido.

Os anéis foram fornecidos pela TEADIT com durezas que atendem ao ASME B16.20 (dureza máxima de 160 HB) e ao API 6A (dureza máxima de 83 HRB), e foram obtidos a partir de matérias-primas usinadas e tratadas, conforme identificação a seguir:

- F – Tubos fundidos (por centrifugação)
- C – Chapas laminadas
- B – Barras forjadas

Como os anéis são de pequenas dimensões foram necessários vários anéis, de mesma corrida para cada processo de obtenção, para conduzir os testes destrutivos (de caracterização do material) e não destrutivos (de vedação sob pressão e dimensionamento).

Os anéis foram testados em diferentes combinações e sua identificação corresponde ao tipo de processo de obtenção e um número sequencial, na forma XY (X – processo de obtenção; Y – número sequencial). Os anéis com numeração par são sempre duplicatas dos anéis com numeração ímpar, por exemplo, o anel C4 é duplicata do C3, assim como o F2 do F1.

Foram adotados, nos testes de vedação, flanges de aço temperado e revenido, identificados como MA, flanges de aço recozido, identificados como MB e flanges de aço austenítico, identificados como MC.

3.2. Métodos

A parte experimental foi conduzida nas instalações da Teadit (que forneceu os anéis, os testes de pressão e o dimensionamento dos anéis), da Tecmetal (que realizou os ensaios mecânicos) e do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFRJ (onde foi realizada a caracterização dos anéis).

3.2.1. Caracterização Metalúrgica dos Anéis

Os anéis tipo X5 e X6 foram caracterizados em ensaios destrutivos.

Análise de composição química

Foi conduzida por espectroscopia de emissão ótica. Esse método utiliza um equipamento que abre um arco elétrico entre um eletrodo e a amostra emitindo luz, por meio do qual é possível um detector analisar os comprimentos de onda e compará-los com aqueles característicos de cada elemento, e também analisar as intensidades luminosas para detectar as quantidades em massa. O equipamento é previamente calibrado para cada tipo de material.

Análise Microestrutural por Microscopia ótica

Foi conduzida a análise microestrutural por microscopia ótica após preparação metalográfica convencional, lixamento até lixa de numeração 2500, polimento em pasta de diamante e ataque eletrolítico em ácido oxálico.

Ensaio de difração de raios-X

Para analisar qualitativamente se houve ocorrência de formação de martensita induzida por deformação, foi empregado o ensaio de difração de raios-X em difratômetro modelo XRD 6000 da marca Shimadzu com radiação de $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), nas condições de 2θ no intervalo de 10° a 80° , faixa de varredura contínua, passo de $0,02^\circ$, velocidade de $2^\circ/\text{min}$. Para a indexação dos picos, foram utilizados como referência os difratogramas apresentados na Figura 8.

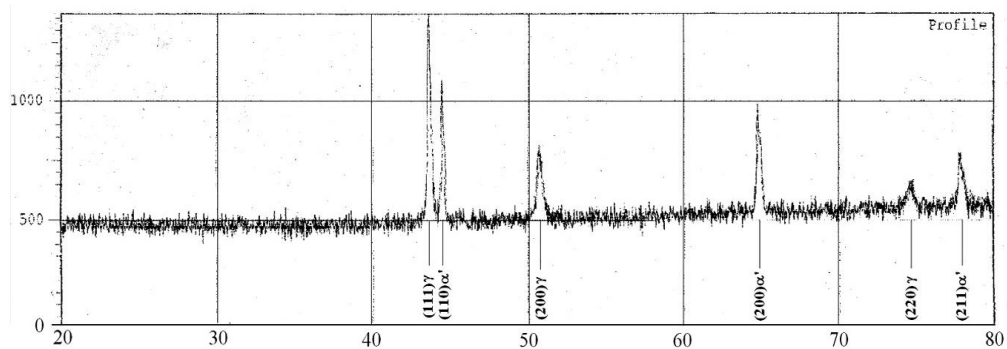


Figura 8 - Difratoograma apresentando os picos de austenita (γ) e martensita (α'). Adaptado de [13].

Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram feitos conforme a norma ASTM A 370 / 2014, utilizando-se máquina modelo EMIC DL 20000, série N 6055 NS004, célula de carga de 20 ton. Os corpos-de-prova de tamanho *subsize*, Figura 9, foram usinados a partir dos anéis na forma final, na sua direção circunferencial, ou longitudinal ao anel.



Figura 9 - Corpo de prova usinado a partir de um anel de vedação para ensaio de tração.

As curvas obtidas nos ensaios de tração (carga x deslocamento) foram transformadas em tensão x deformação e obtidos os valores de tensão limite de escoamento (LE) e tensão limite de resistência (LR). Foram também levantados, para os materiais obtidos por cada tipo de processamento, os valores típicos da relação LE/LR que permitiu posteriormente relacionar os valores de dureza com os valores de tensão limite de escoamento, como apresentado no tópico de ensaios de dureza.

As curvas de tração foram convertidas em tensão verdadeira e levantado o parâmetro expoente de encruamento para cada tipo de material.

Ensaio de dureza

Todos os anéis foram testados em sua face, em três posições ao longo do perímetro, pelo método Rockwell B de acordo com a ASTM E18 – 2013, utilizando-se máquina de ensaio Fixo Test série 737 – Dureza HRBW, esfera de 1/16”, carga de 100 kg. Posteriormente, para fins de comparação entre os conjuntos de anéis e flanges, foi feita a conversão das durezas para medida de dureza Brinell (HB).

Os valores de dureza foram utilizados para estimar o valor da tensão limite de resistência de cada anel, através da equação: $LR = 3,6.HB$, sendo LR, o limite de resistência em MPa e HB a dureza em HB [21]. Para estimar a tensão limite de escoamento de cada anel foi utilizada sua tensão limite de resistência (estimada pela dureza) e aplicada a relação LE/LR.

3.2.2. Testes de Vedação e Dimensionamento dos Anéis

Apesar destes testes terem sido considerados “não destrutivos”, os anéis de fato foram amassados nos testes de vedação devido à carga aplicada nos anéis.

Os testes de vedação consistiram em aplicar uma carga crescente entre os flanges (simulando o aperto dos parafusos) e identificar a carga na qual ocorreu a estanqueidade do conjunto, identificado como o mínimo **aperto para alcançar a estanqueidade**, para uma pressão interna de gás metano que corresponde à de uma linha de #600.

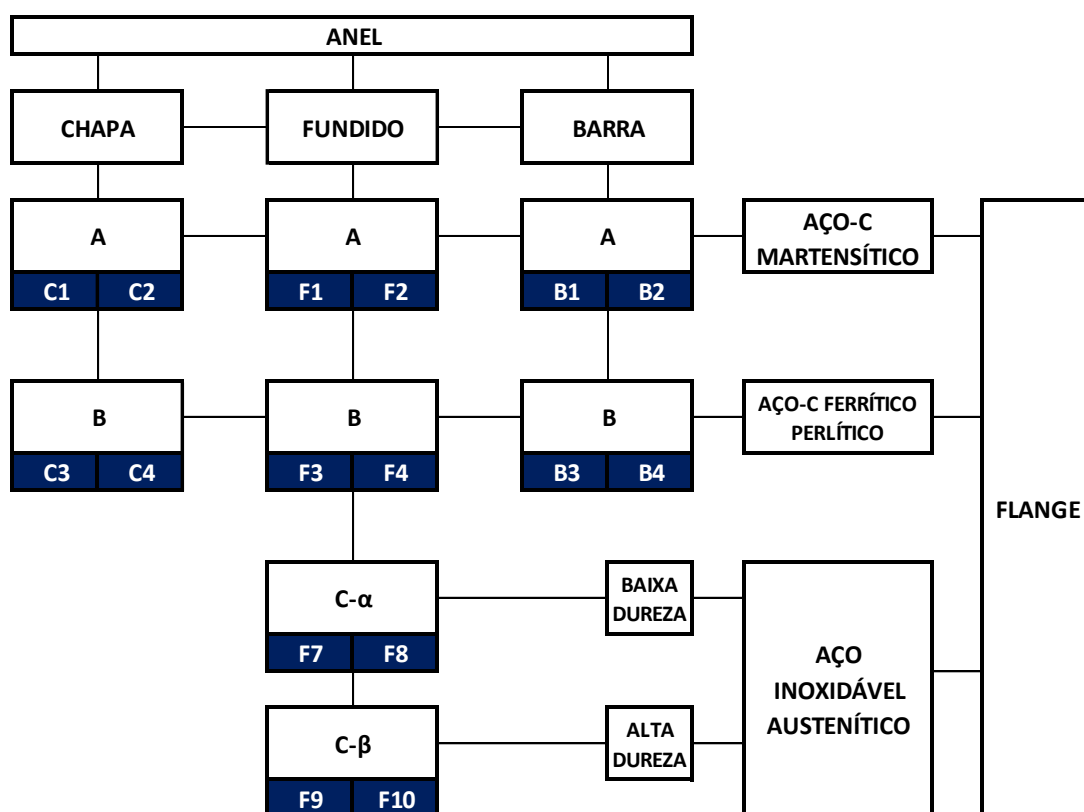
Depois de chegar na carga máxima de 37200 kgf, compatível com o aperto de quatro parafusos de 5/8” tipicamente utilizados em flanges #600, foi identificada a carga onde a conexão deixou de ser estanque, identificado como o mínimo **aperto para manter a estanqueidade**.

Os ensaios foram conduzidos em conjuntos utilizando flanges e anéis com diferentes características, sendo cada ensaio único (não foi reutilizado nenhum material de flange ou anel). Os anéis deste estudo apresentaram durezas entre 69 e 81 HRB (entre 119 e 149 HB) e os flanges utilizados foram: de aço ao carbono recozido de baixa dureza (73 HRB, que corresponde a cerca de 130 HB), de aço ao carbono temperado e revenido de alta dureza (39 HRC Rockwell C que corresponde a 360 HB), e de aço inoxidável austenítico de baixa e de alta durezas (variando entre 81 e 84 HRB que correspondem a 149 a 160 HB).

Para cada ensaio foram testadas duas amostras de mesma característica, como evidenciado no planejamento da Figura 13, que mostra esquematicamente as combinações entre flanges e anéis de diferentes naturezas, avaliados nestes testes de vedação e dimensionamento.

Pode-se constatar que os anéis tipo X1 e X2 foram testados em flanges indeformáveis; os anéis tipo X3 e X4 em flanges de aço ao carbono mais macios e os anéis X7, X8, X9 e X10 em flanges de aço inoxidável.

Para cada conjunto foram levantados os apertos mínimos para alcançar a estanqueidade e para manter a estanqueidade, e para cada conjunto foram realizados os dimensionais dos flanges e do anel.



- A. vedação em flanges indeformáveis (aço temperado e revenido de alto limite de escoamento) buscando identificar as forças para vedação em diferentes pressões, e controle dimensional dos anéis antes e após o teste.
- B. vedação em flanges de aço ao carbono recozido, na menor dureza possível do flange e na maior dureza para o anel, buscando identificar se, quando são simuladas as forças relativas às maiores pressões, ocorre algum dano ao flange.
- C. Vedação em flanges de aço inoxidável, com dureza típica máxima (C- α) e mínima (C- β) de flanges disponíveis no mercado, buscando identificar deformação causada nos flanges e influência de vedação.

Figura 10 - Combinações de testes de vedação.

Testes de vedação

Os testes de vedação foram realizados em temperatura ambiente e seguiram a sequência de apertos por prensa hidráulica em passos de 2400 kgf, verificando-se o vazamento através do instrumento TVA2020, iniciando em 1200 kgf até 37200 kgf. Após isso, procede-se com o alívio da carga também em passos de 2400 kgf, mantendo-se a medição de vazamentos. Espera-se 10 minutos entre mudanças de carga na prensa. Conforme procedimentos nos laboratórios da Teadit, vazamentos abaixo de 10 ppm de metano são considerados estanques para vedação.

O dispositivo de teste foi desenvolvido pela Teadit, conforme desenho técnico (Figura 11), onde as peças 1, 2, 4 e 5 são reutilizadas. As posições 6 e 7 simulam os flanges e na posição 3 está a junta de vedação, os mesmos podem também ser observados na Figura 12.

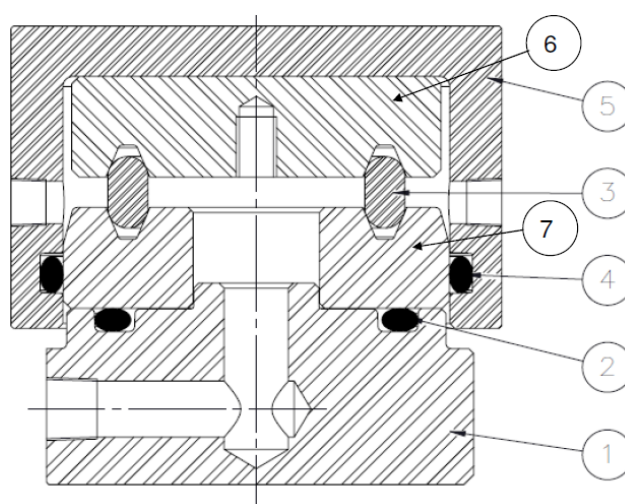


Figura 11 - Desenho em corte do dispositivo de testes de vedação.

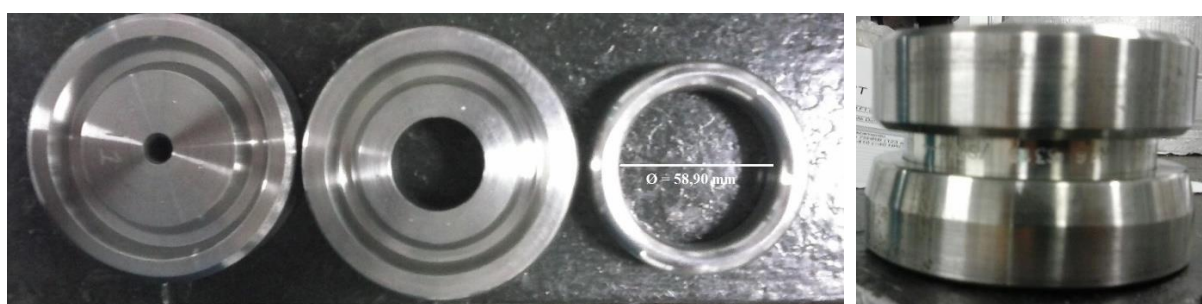


Figura 12 - Parte superior e inferior do flange e anel (esquerda); conjunto montado (direita).

O dispositivo é colocado em uma prensa hidráulica, sendo pressurizado internamente com gás metano a 100 bar pelo canal inferior (Figura 11). A carcaça (5) possui dois furos, tal que em um acopla-se uma mangueira ligada a um analisador de vapores modelo TVA2020 da marca

Thermo Scientific (Figura 13), e no outro existe uma válvula de purga. Também foi fixado um medidor de deslocamento como pode ser observado na Figura 13.

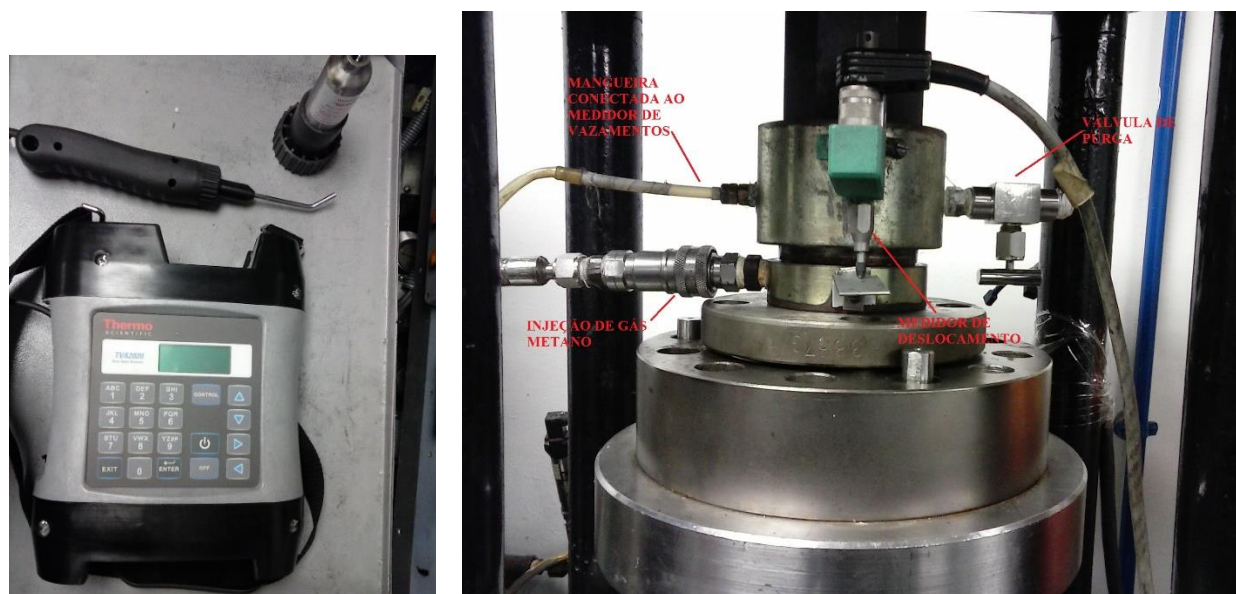


Figura 13 - Analisador de vapores TVA2020 (esquerda) e aparato completo para ensaio de vedação (direita).

O resultado de cada teste é apresentado em um gráfico de vazamento (em ppm) por carregamento durante aperto e durante desaperto. Os valores de aperto mínimo para alcançar a estanqueidade e aperto mínimo para manter a estanqueidade foram retirados do gráfico, como correspondentes ao valor de carga para o vazamento de 10 ppm.

Dimensionamento dos flanges e anéis

Todos os anéis e os canais dos flanges que sofreram teste de vedação tiveram suas seções transversais dimensionadas por equipamento de mapeamento tridimensional a laser. O software apresenta uma imagem com valores de deformação linear pontual e áreas afetadas pelo escoamento.

O valor de deformação (em mm) adotado nesta análise corresponde ao valor da máxima deformação linear verificada em cada anel e em cada flange.

4. Resultados

4.1. Composição química

A Tabela 7 apresenta a composição dos anéis testados, de chapa, tubo e barra, e os limites de composição para um aço AISI 316. Constata-se que os anéis variam um pouco de composição química e nem todos apresentam teores de carbono que poderiam caracterizá-los como de baixo carbono. O anel B5 apresentou quantidade de S superior à especificado e o anel B6 mostrou valores de Si altos.

Tabela 7 – Composição química dos anéis.

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	Cu	Al	B
Anel C5	0,025	0,493	1,33	16,31	10,49	2,15	0,038	0,007	0,147	-	0,0017
Anel C6	0,031	0,500	1,39	16,61	10,25	2,10	0,009	0,009	0,177	0,0021	0,0021
Anel F5	0,045	0,590	0,89	16,29	11,29	2,34	0,041	0,009	0,155	-	0,0015
Anel F6	0,043	0,610	0,89	16,40	11,37	2,37	0,041	0,009	0,140	-	0,0015
Anel B5	0,028	0,401	1,76	17,13	9,91	2,00	0,035	0,040	0,410	0,0032	0,0023
Anel B6	0,039	1,050	1,02	16,90	10,90	2,25	0,026	0,012	0,093	0,0075	0,0170
316	0,080	1,000	2,00	16,00 - 18,00	10,00 - 14,00	2,00 - 3,00	0,045	0,03	-	-	-

*Medidas em % em peso

[6]

4.2. Análise microestrutural por microscopia ótica

Nas Figuras de 14 a 17, observam-se os anéis fabricados a partir de chapas laminadas C5 e C6. O aspecto metalográfico revelou microestrutura formada por matriz austenítica (γ) com grãos maclados e ilhas de ferrita delta (δ) alinhadas na direção de laminação. O tamanho de grão austenítico e o alinhamento da ferrita delta variaram um pouco entre as amostras.

Nas Figuras 18 a 21, observa-se a microestrutura dos anéis fundidos. O aspecto metalográfico revela microestrutura formada por matriz de austenita (γ) com ilhas de ferrita delta (δ) no espaçamento interdendrítico.

As Figuras 22 a 25 mostram a microestrutura dos anéis fabricados de barras forjadas. O aspecto metalográfico dos anéis de barra revelou microestrutura formada por matriz austenítica (γ) com grãos maclados e pequenas ilhas dispersas de ferrita delta (δ). Existe também uma pequena variação de tamanho de grão austenítico.



Figura 14 - Micrografias do anel C5 com aumento nominal de 50x.

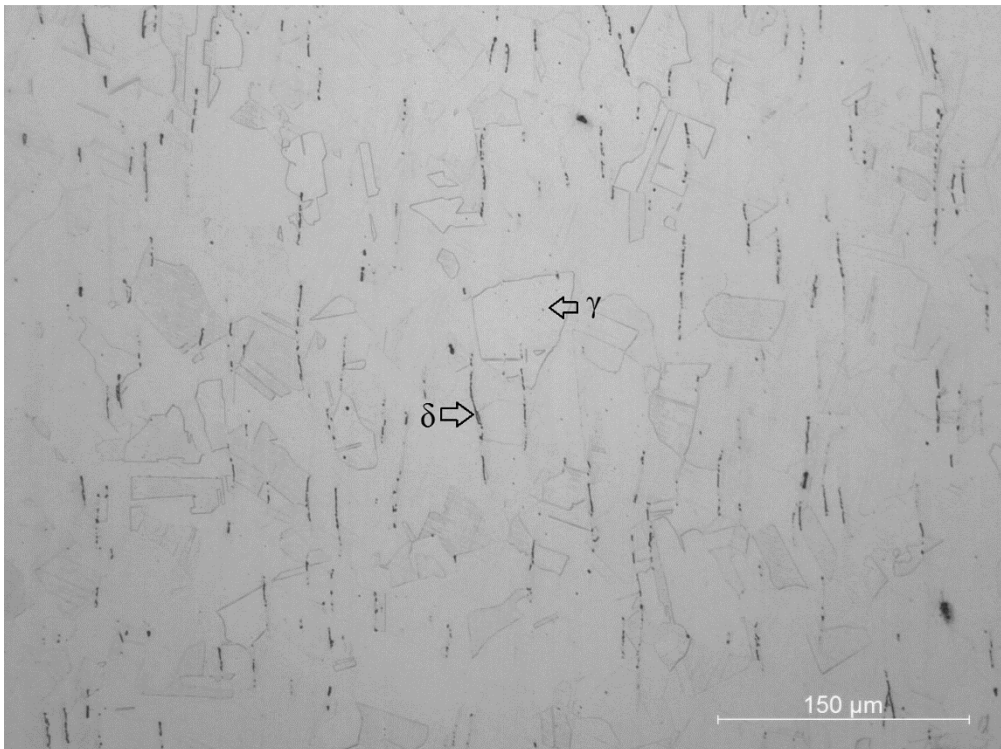


Figura 15 - Micrografia do anel C5 com aumento nominal de 200x.

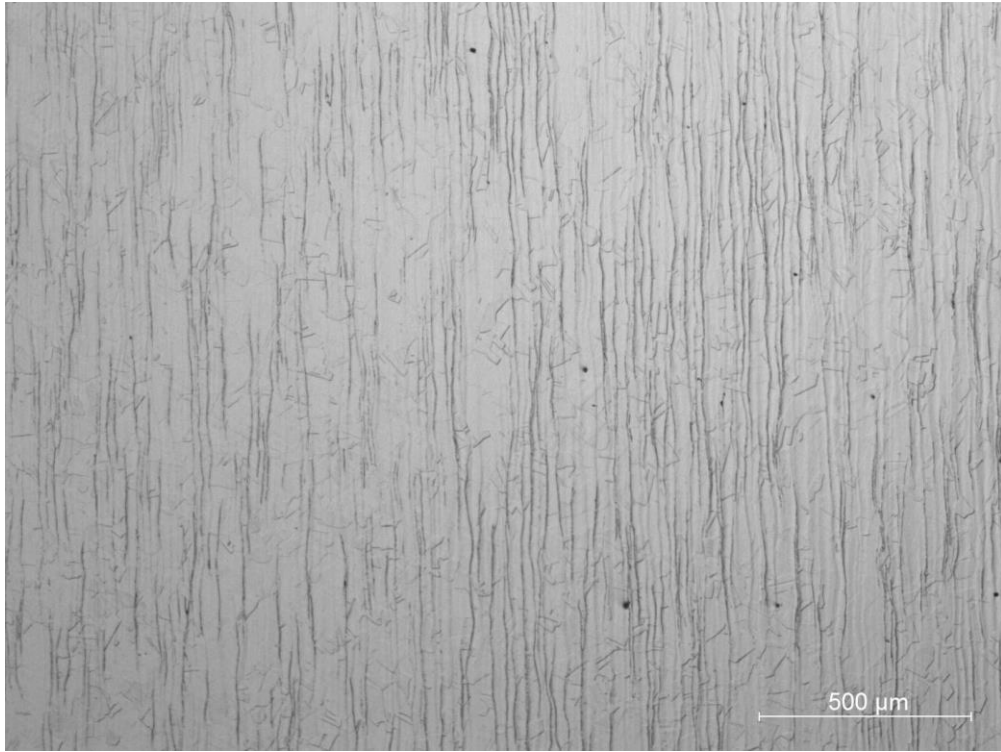


Figura 16 - Micrografia do anel C6 com aumento nominal de 50x.



Figura 17 - Micrografia do anel C6 com aumento nominal de 200x.

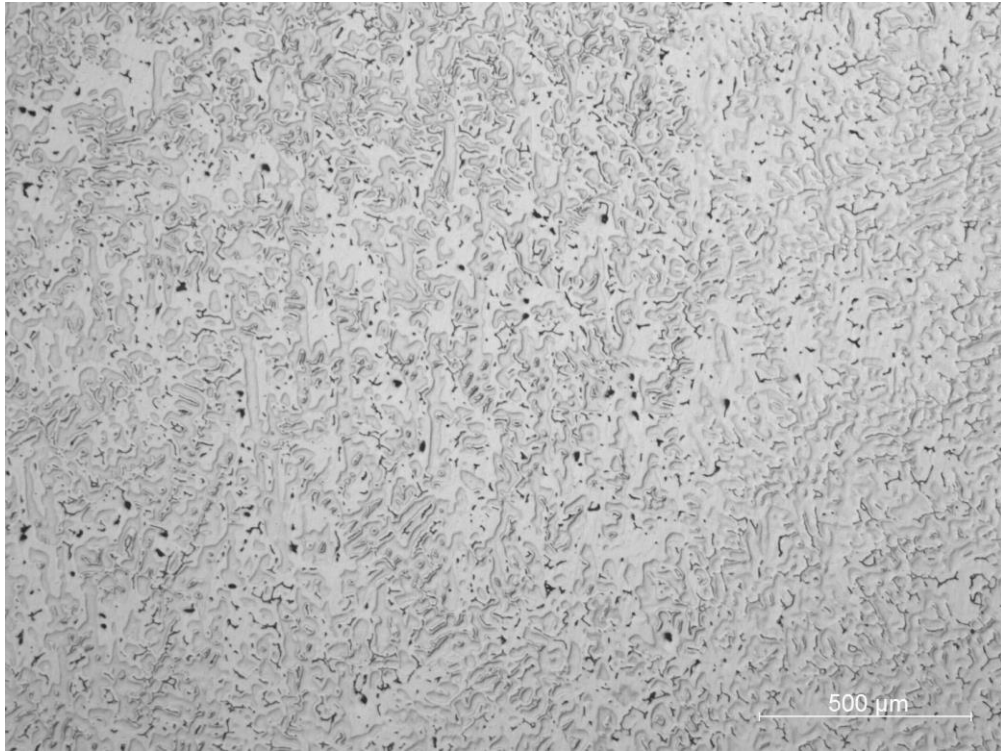


Figura 18 - Micrografia do anel F5 com aumento nominal de 50x.

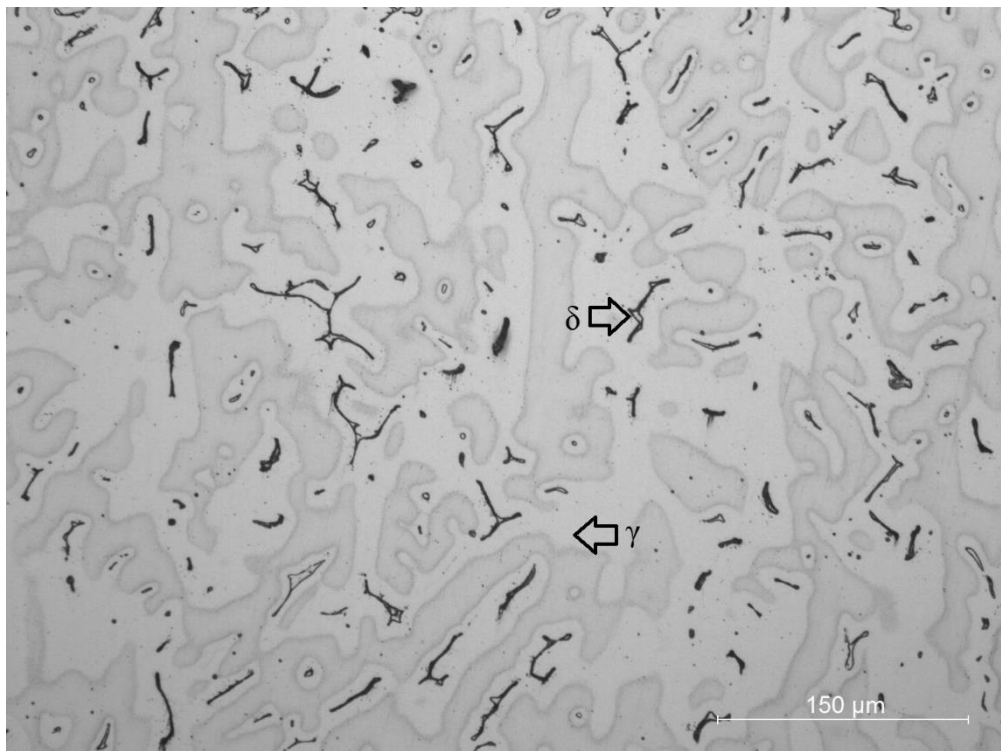


Figura 19 - Micrografias do anel F5 com aumento nominal de 200x.

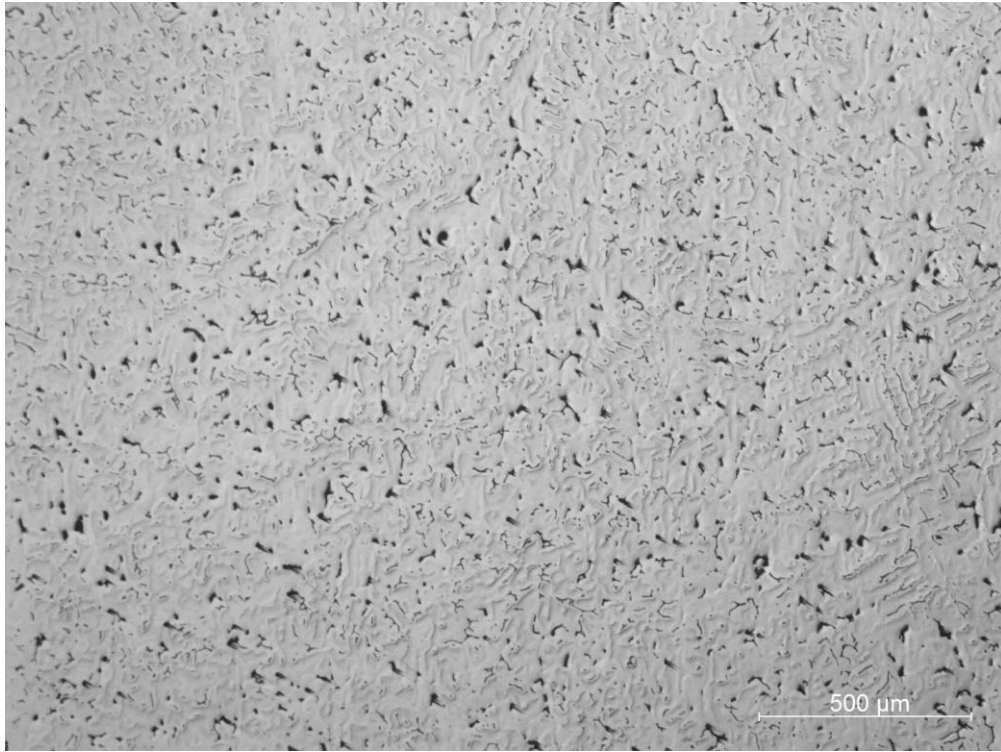


Figura 20 - Micrografia do anel F6 com aumento nominal de 50x.

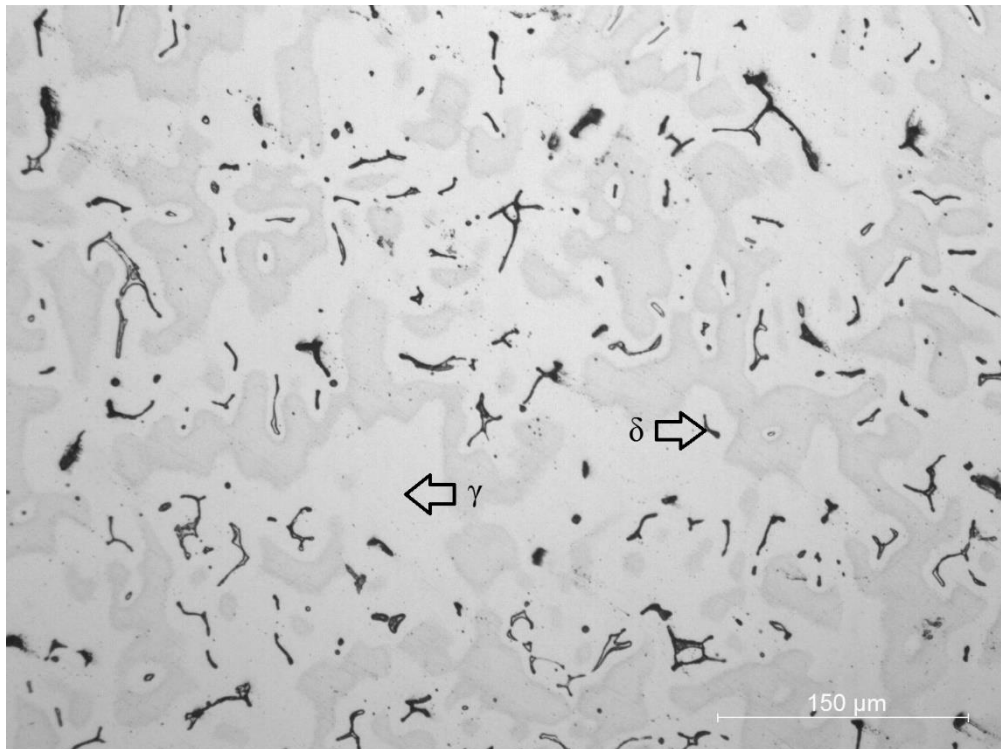


Figura 21 - Micrografia do anel F6 com aumento nominal de 200x.

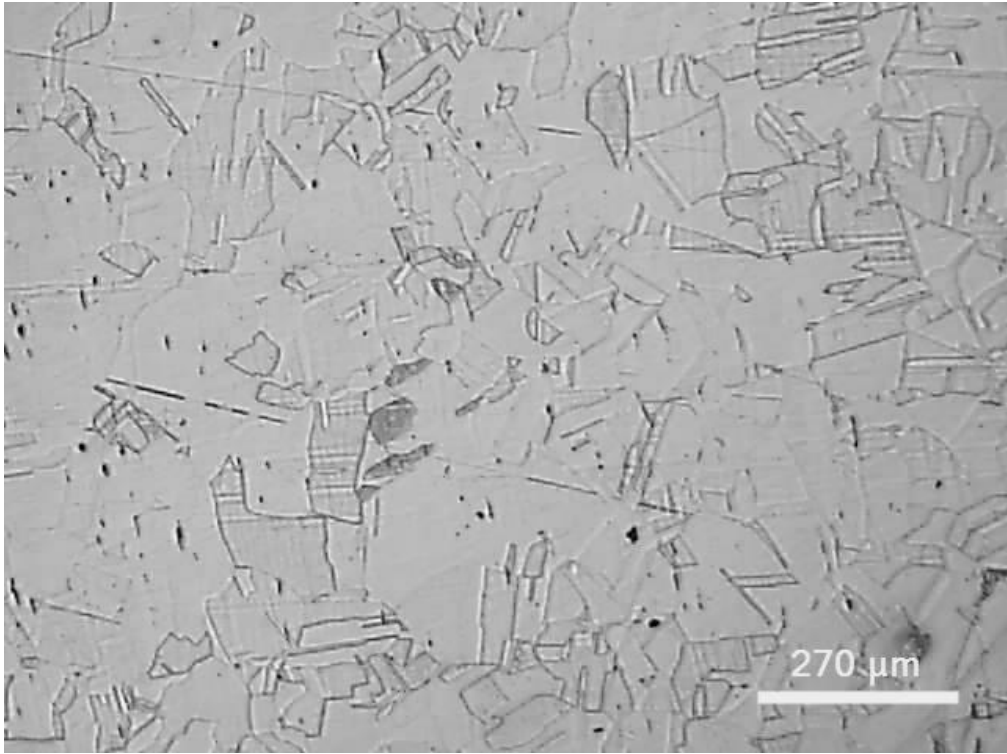


Figura 22 - Micrografia do anel B5 com aumento nominal de 50x.

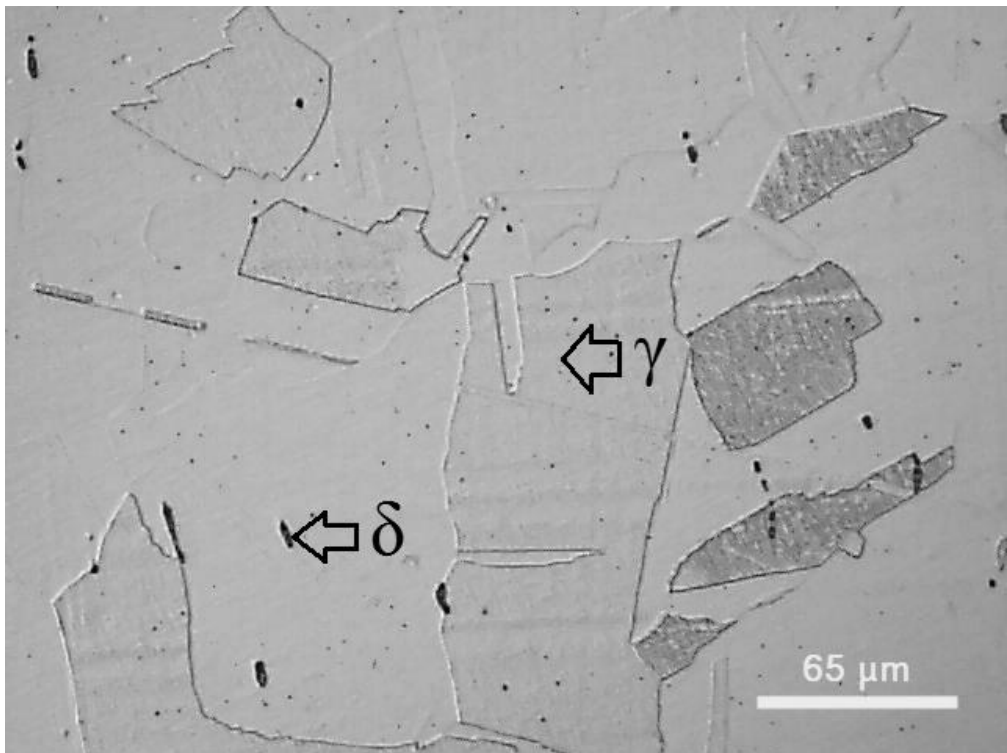


Figura 23 - Micrografia do anel B5 com 200x de aumento.

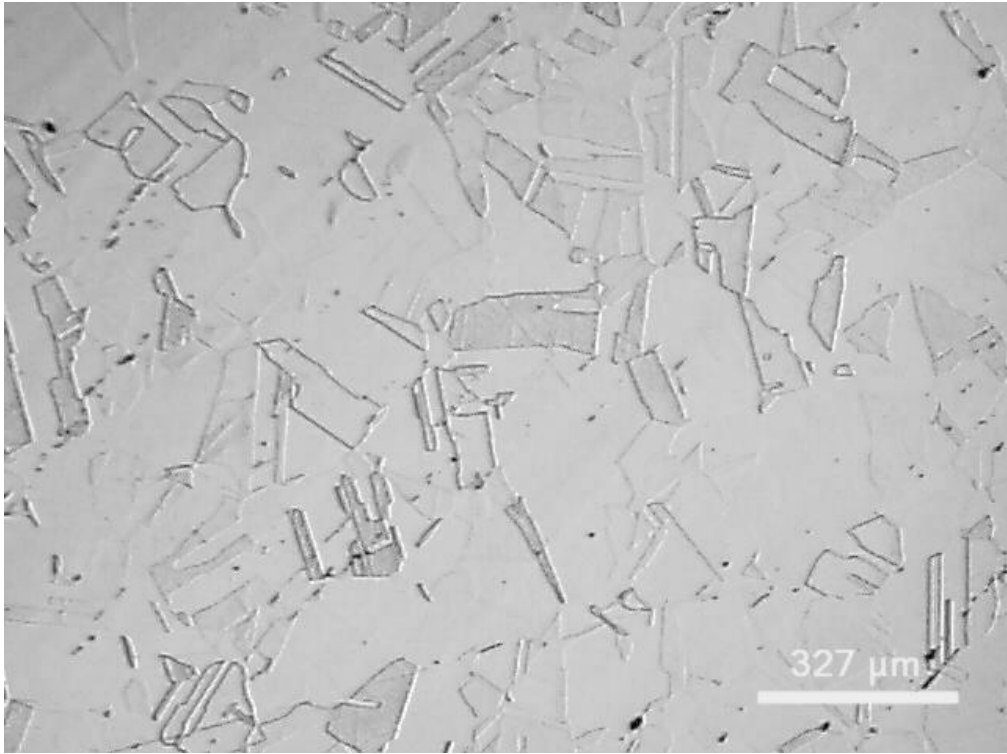


Figura 24 - Micrografia do anel B6 com aumento nominal de 50x.

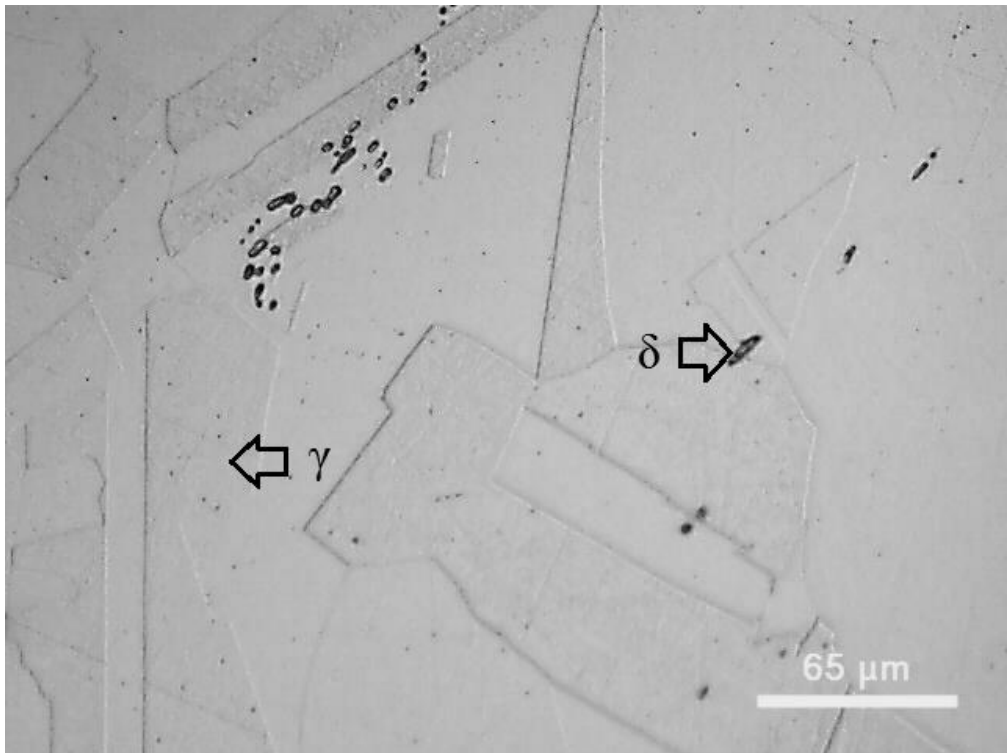


Figura 25 - Micrografia do anel B6 com aumento nominal de 200x.

4.3. Ensaios de difração de raio-X

Os resultados dos ensaios em todos os anéis, difratogramas dos ensaios de DRX nas Figuras 26 a 28, somente evidenciaram os picos $(111)_{\gamma}$, $(200)_{\gamma}$ e $(220)_{\gamma}$ que são todos da fase austenita, o que pode ser confirmado quando comparado com o difratograma na Figura 8.

Logo, desconsidera-se a formação significativa de martensita induzida por deformação e a diferença na quantidade de ferrita delta observada nas micrografias não foi resolvida nestes espectros.

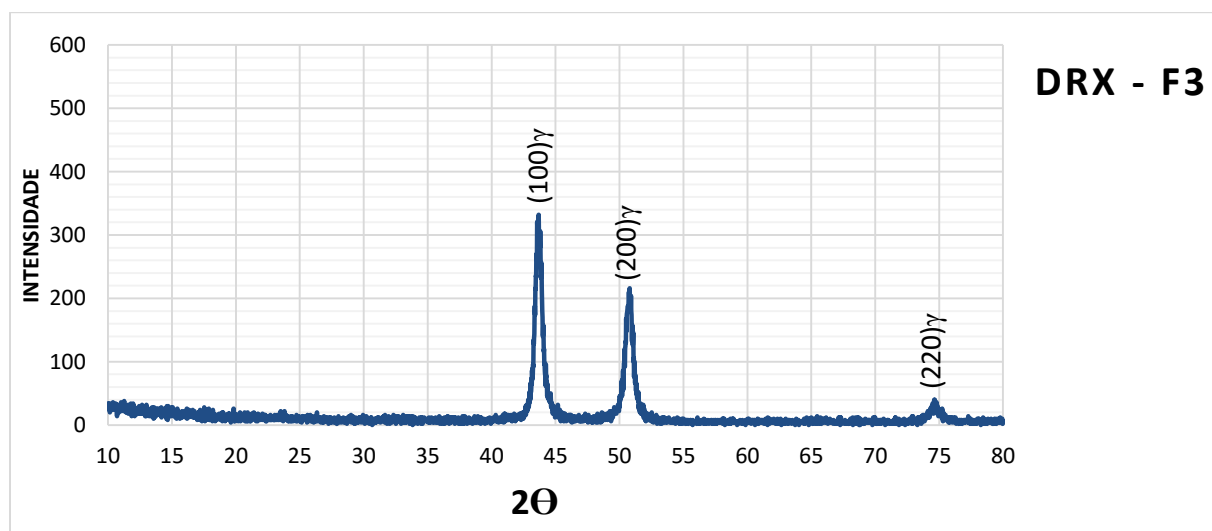


Figura 26 - Difratograma do anel de fundido, mostrando picos de austenita.

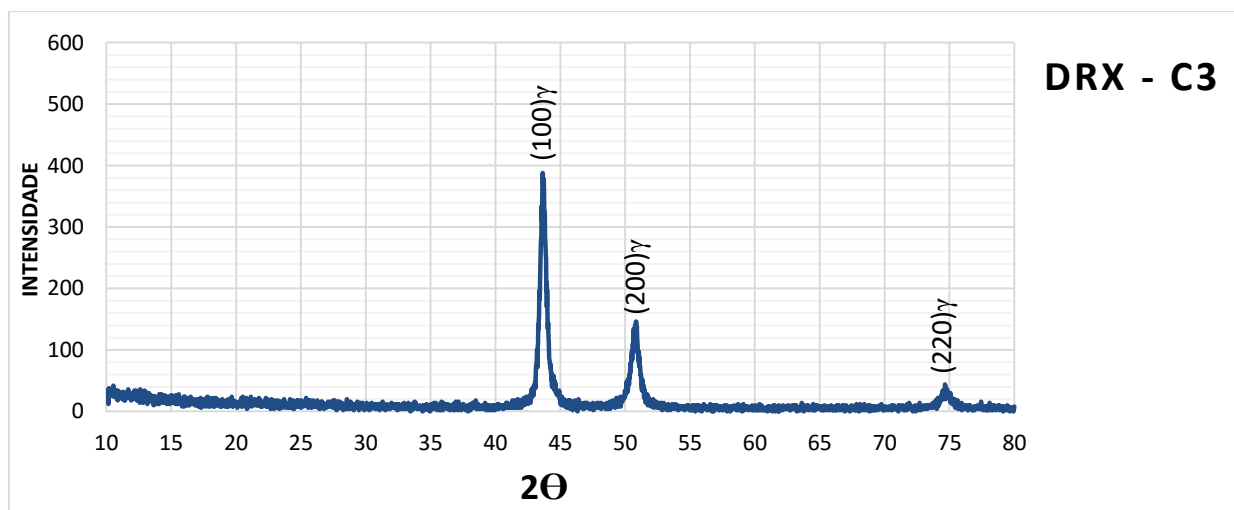


Figura 27 - Difratograma do anel de chapa, mostrando picos de austenita.

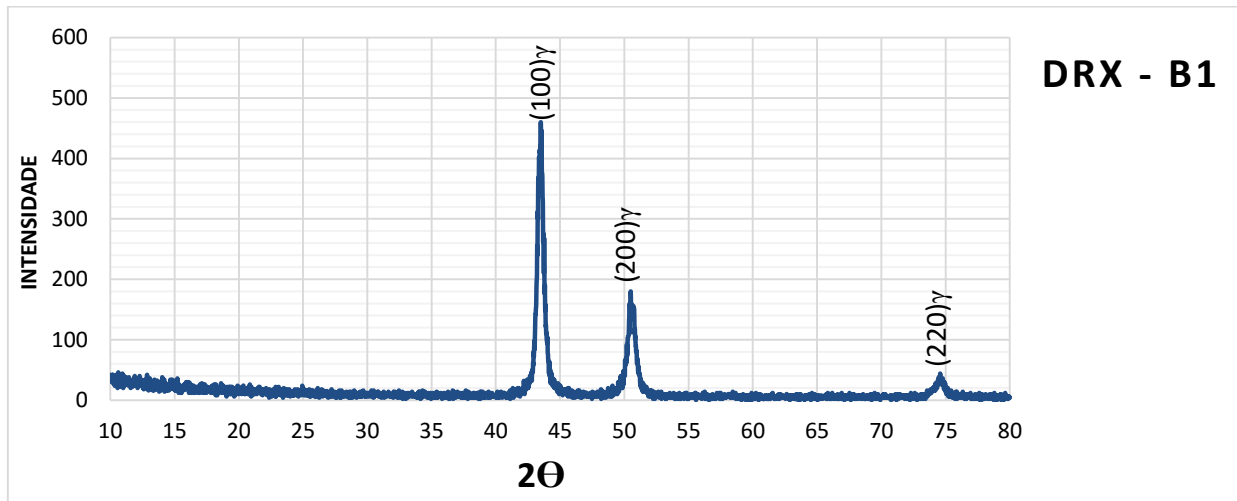


Figura 28 - Difratoograma do anel de barra forjada, mostrando picos de austenita.

4.4. Ensaio de tração

As curvas de tração estão apresentadas na Figura 29 e os valores de propriedades estão resumidos na Tabela 8. Consta-se que os anéis fundidos apresentam valores de tensão limite de escoamento e tensão limite de resistência inferiores aos anéis de barra e de chapa. Os anéis de barra são os de maior tensão limite de escoamento e também de menor ductilidade medida pelo alongamento

Tabela 8 – Valores das propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração.

Corpo de Prova	Limite Escoamento (MPa)	Limite Resistencia (MPa)	LE/LR	Alongamento (%)
Chapa	371	669	0,55	86,7
Fundido	292	562	0,52	70,8
Barra	448	653	0,69	46,3

Na relação LE/LR constata-se que a barra é a que apresenta o maior valor (0,69), indicando que para o mesmo nível de dureza este tipo de material é o que apresenta a maior tensão limite de escoamento. Os expoentes de encruamento foram calculados, e os valores de 0,28 para a barra, 0,37 para a chapa e 0,35 para o fundido, indicam que a chapa é entre estes materiais aquele que mais facilmente aumentaria sua dureza para a mesma tensão aplicada.

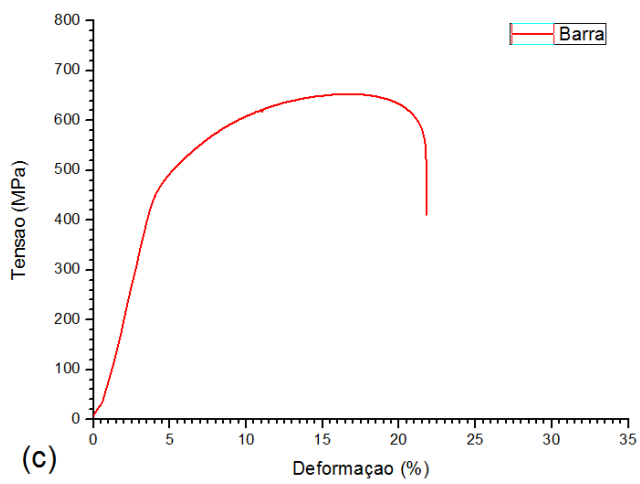
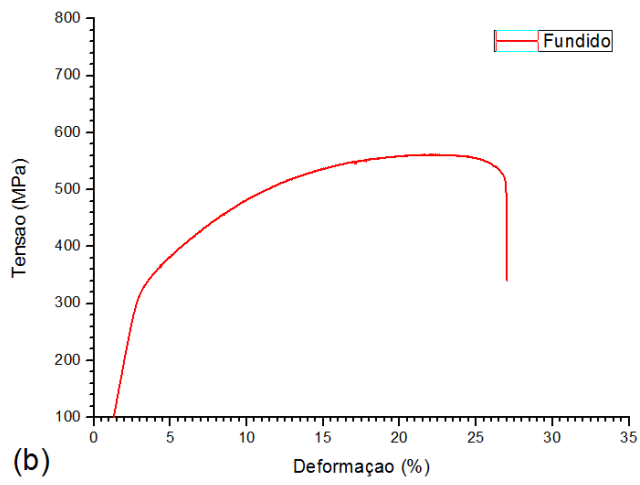
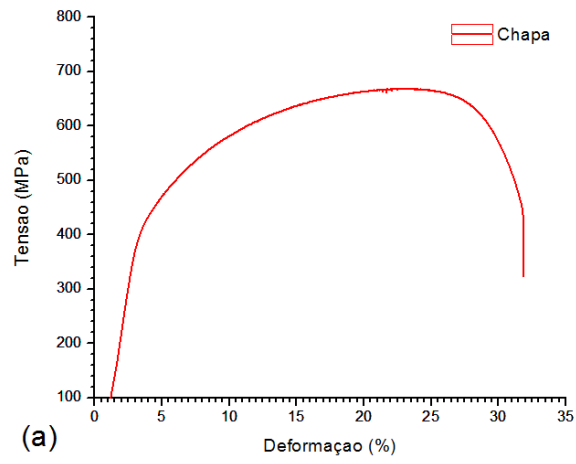


Figura 29 - Curvas de tração de anéis fabricados de chapas (a), fundidos (b) e barras (c).

4.5. Medidas de Dureza

Todos os anéis de vedação tiveram sua dureza medida em diferentes pontos, sendo seus valores médios exibidos na Tabela 9.

Tabela 9 - Dureza Rockwell B dos anéis X5 e X6.

C5	78 HRB	F5	71 HRB	B5	67 HRB
C6	77 HRB	F6	71 HRB	B6	66 HRB

Na Tabela 10 encontram-se as durezas medidas nos anéis e seus respectivos conjuntos de flanges, que seguiram para os ensaios de vedação. Os testes nos anéis C1 e C2 não ficaram prontos a tempo para serem incluídos neste trabalho.

Tabela 10 – Durezas de todos os anéis de vedação e flanges.

Anéis		Dureza(HRB)	Dureza(HRB)		Flanges
Fundidos	F1	72	110*	MA1	Martensítico
	F2	73	110*		
	F3	71	73	MB1	Aço C. Recozido
	F4	72	73		
	F7	71	84	MC1-1	Aço Inox. Austenítico
	F8	69	84		
F9	72	82	MC2-1		
F10	73	81			
Chapa	C3	81	73	MB3	Aço C. Recozido
	C4	79	74		
Barra	B1	72	110*	MA1	Martensítico
	B2	72	110*		
	B3	72	73	MB5	Aço C. Recozido
	B4	72	74		

*Dureza obtida em 39HRC sendo convertida com aproximação

Na Tabela 10, vale ressaltar que existem casos com anéis mais duros que os flanges de aço carbono (C3 e C4) e anéis com durezas similares aos flanges de aço carbono (F3, F4, B3 e B4). Cabe ressaltar também que não é garantido que um aço carbono com menor dureza irá se deformar primeiro quando comparado com um aço inoxidável austenítico, pois a propriedade que governa a deformação plástica é a tensão limite de escoamento. Sendo que os aços inoxidáveis austeníticos, em geral apresentam menor tensão limite de escoamento quando comparado com o aço carbono, para mesmo nível de dureza, ou seja, menor LE/LR.

4.6. Testes de Vedação

Os gráficos de vazamento contra carregamento nos flanges estão apresentados nas Figuras 30 a 43, para cada combinação entre flange e anel, lembrando que o mínimo aperto para alcançar a estanqueidade e o mínimo aperto para manter a estanqueidade são valores que foram tirados dos gráficos para a medida de 10 ppm de metano. A Figura 44 apresenta estes valores resumidos.

Algumas características identificadas nos gráficos merecem menção:

- Apesar de todos os anéis apresentarem mesmo dimensional e especificação, as cargas mínimas para alcançar a estanqueidade variaram muito, sendo que algumas estão bem próximas do máximo aperto de um conjunto de #600, ou seja a estanqueidade não é facilmente assegurada.
- O aperto mínimo requerido variou entre 5000 kgf e 35000 kgf (ou seja, alguns anéis precisaram de 7 vezes mais aperto do que outros) e em várias condições os valores para manter a estanqueidade foram maiores do que para alcançar a estanqueidade.
- Os testes nos anéis F8, F9 e F10 apresentaram vazamentos irregulares durante o ensaio, que pode ter relação com a forma da deformação durante o escoamento simultâneo do anel e do canal do flange, já que este é um caso de interação de materiais macios similares, onde podem existir efeitos de adesão.
- Os anéis C3 e C4 obtiveram sólida estanqueidade para baixa carga imposta, apresentando excelente desempenho na vedação do conjunto flangeado.
- O anel B1 teve valores de vazamento extremamente irregulares ao longo do ensaio, e muito diferentes do anel B2 que é uma réplica, e existe a possibilidade de ter havido poluição do ambiente com gás metano, pois este é utilizado em outros equipamentos do laboratório.

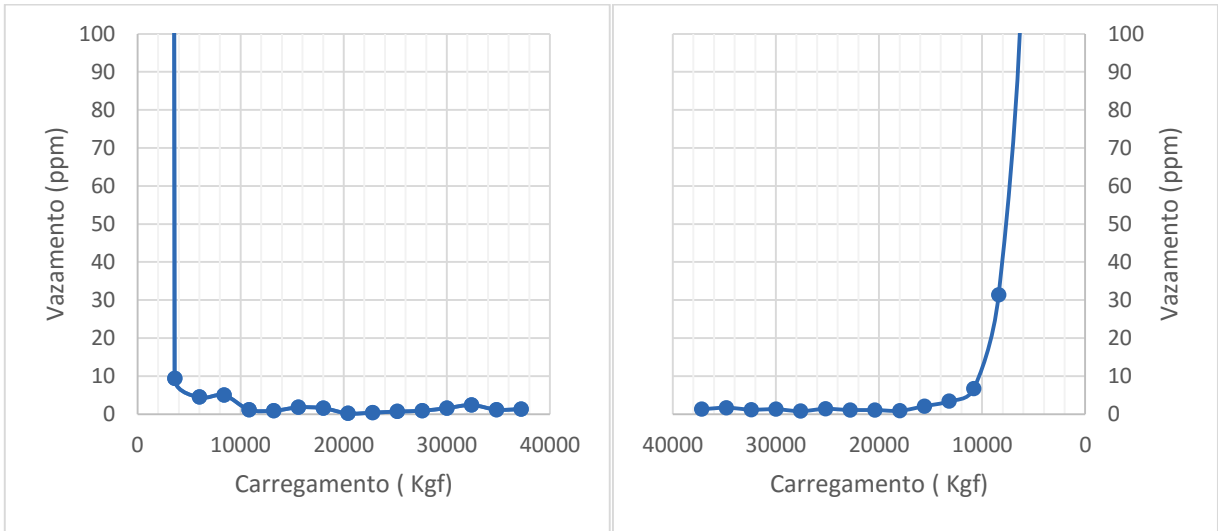


Figura 30 - Ensaio de Vedação do Anel F1, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).

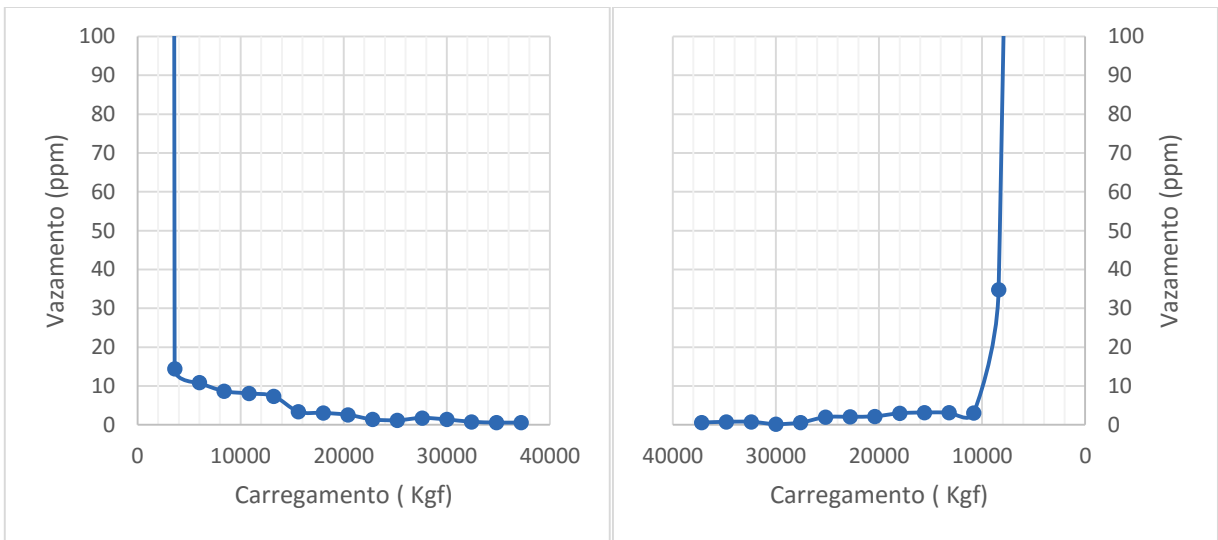


Figura 31 - Ensaio de Vedação do Anel F2, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).

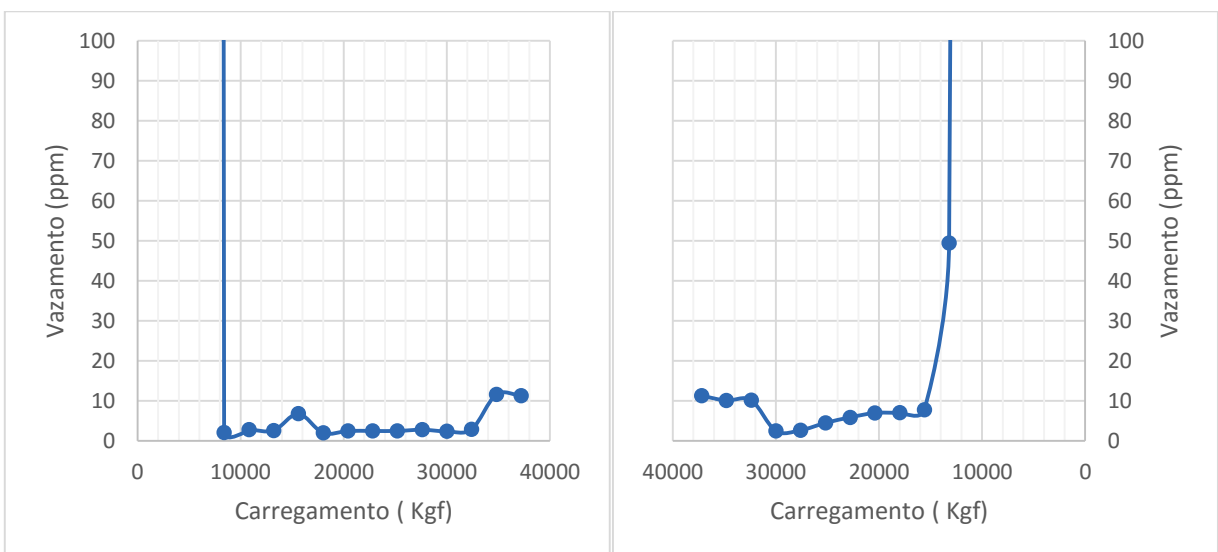


Figura 32 - Ensaio de Vedação do Anel F3, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).

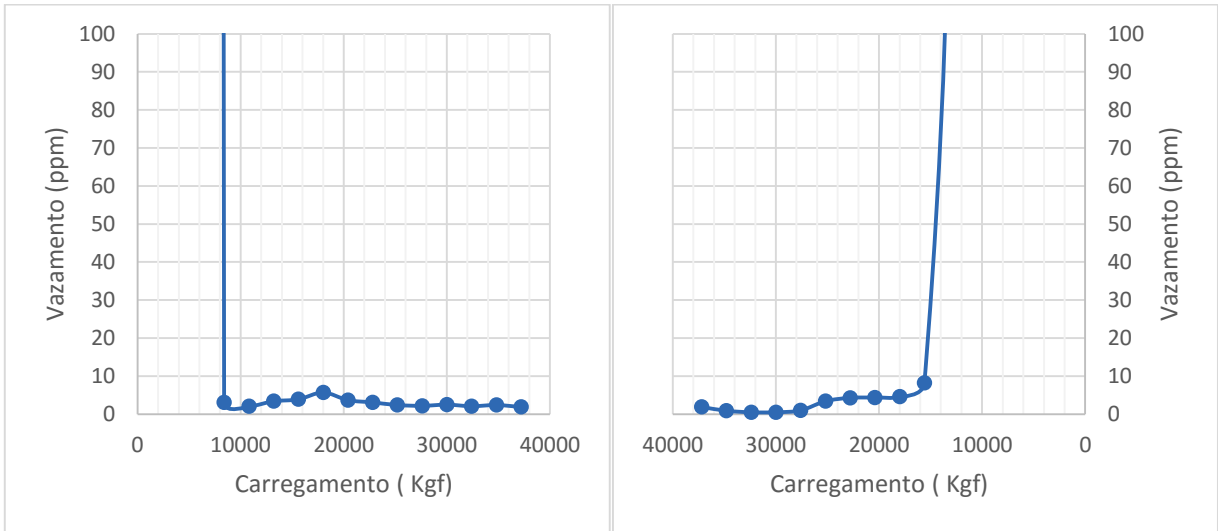


Figura 33 - Ensaio de Vedação do Anel F4, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).

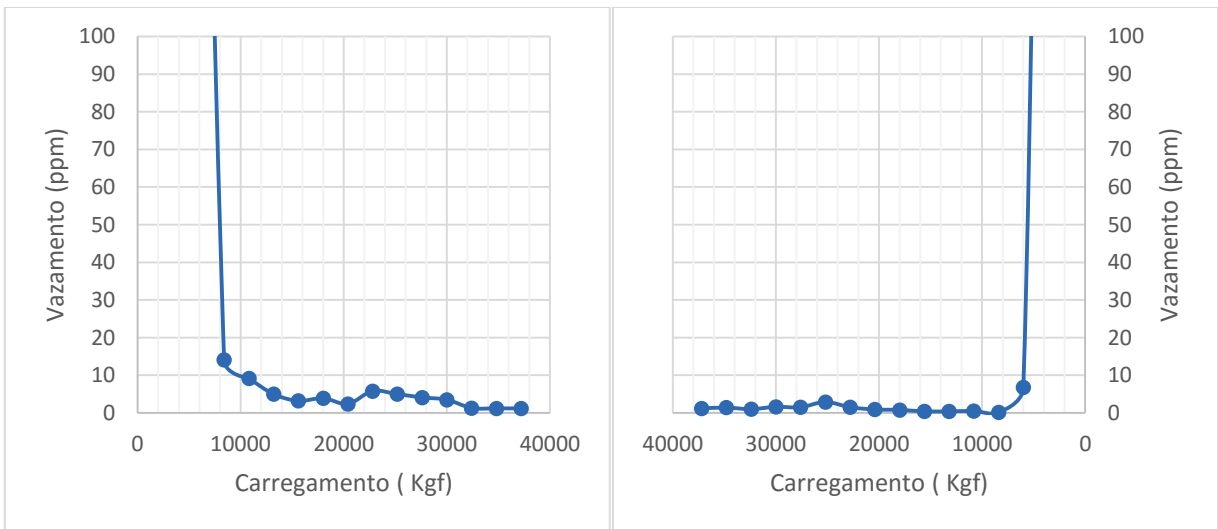


Figura 34 - Ensaio de Vedação do Anel F7, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).

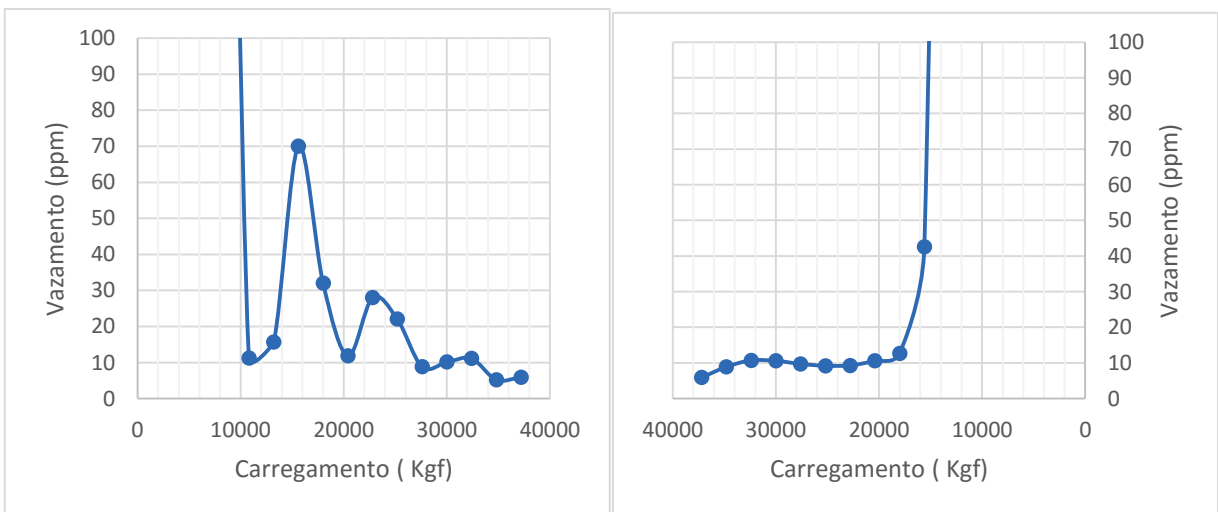


Figura 35 - Ensaio de Vedação do Anel F8, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).

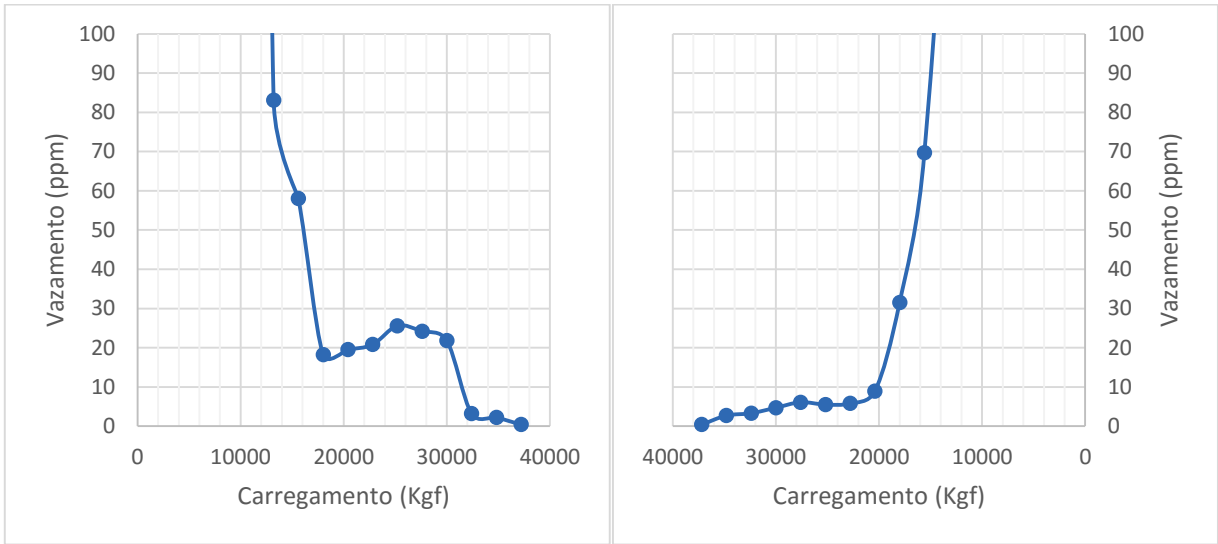


Figura 36 - Ensaio de Vedação do Anel F9, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).

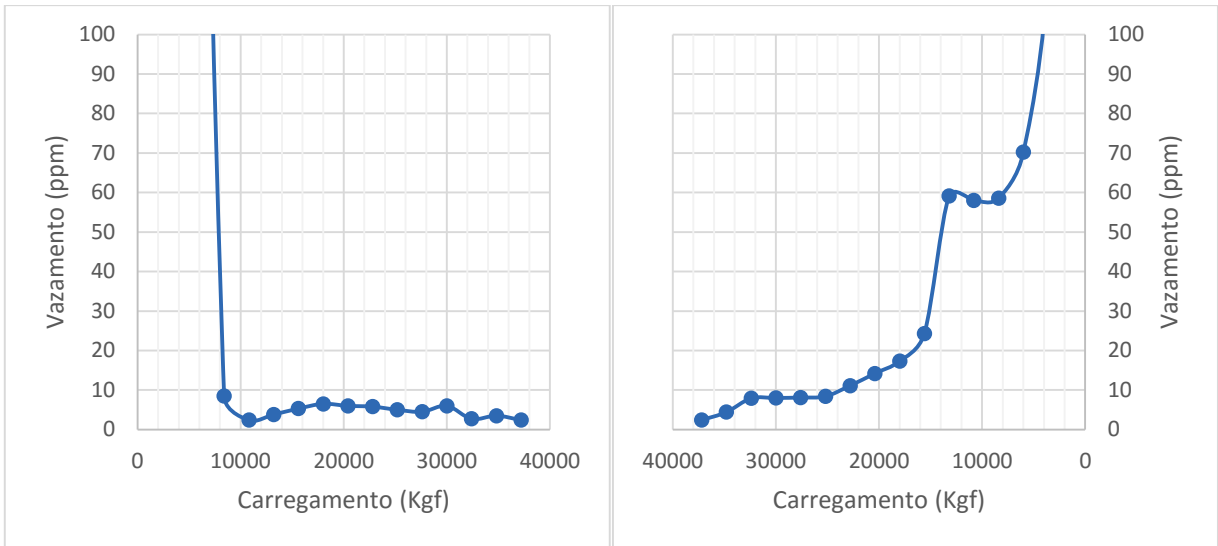


Figura 37 - Ensaio de Vedação do Anel F10, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).

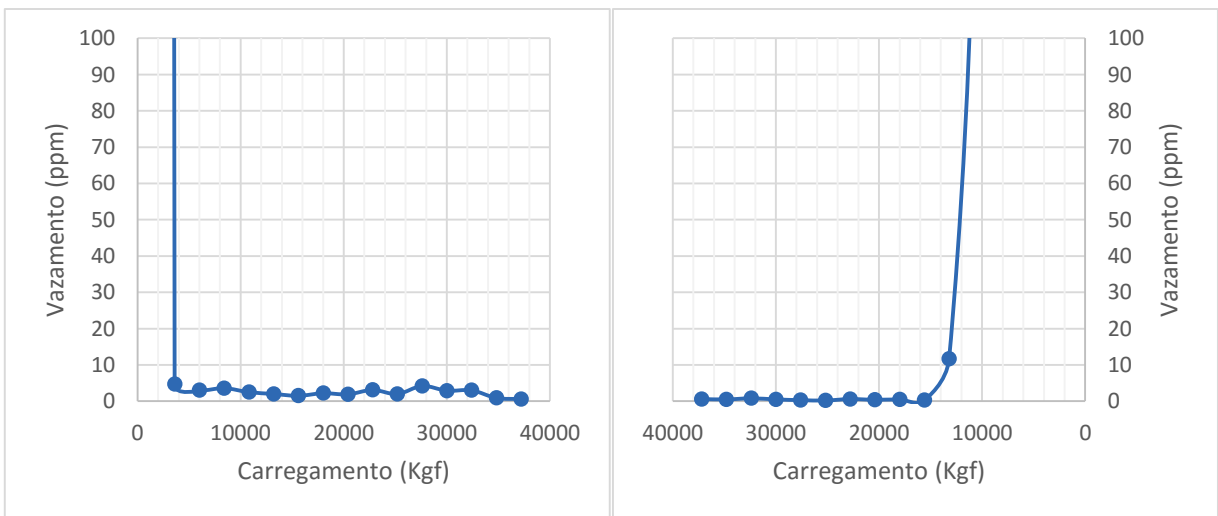


Figura 38 - Ensaio de Vedação do Anel C3, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).

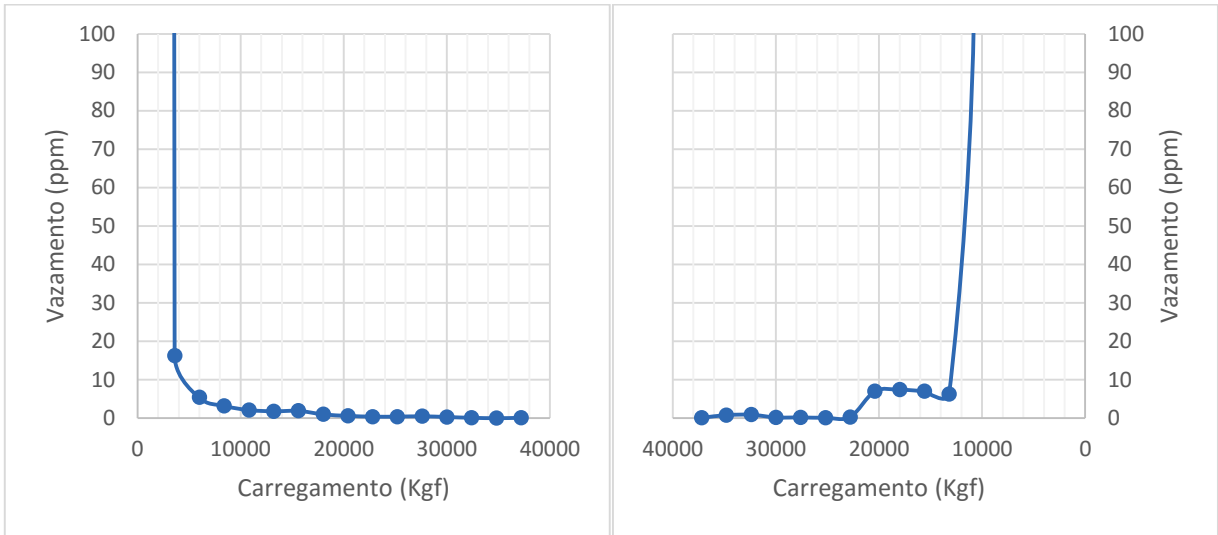


Figura 39 - Ensaio de Vedação do Anel C4, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).

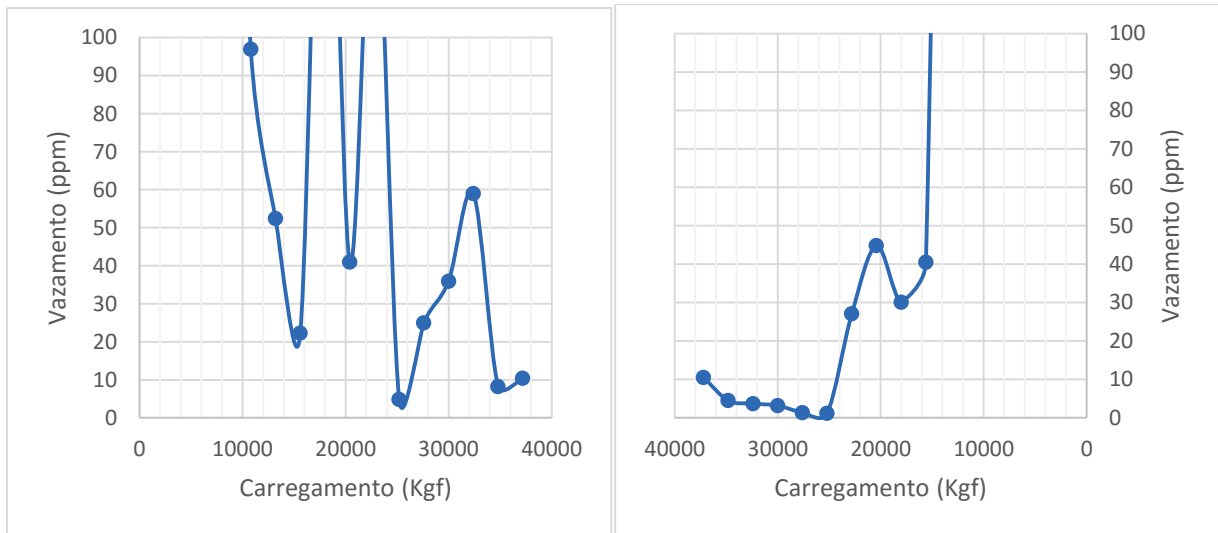


Figura 40 - Ensaio de Vedação do Anel B1, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).

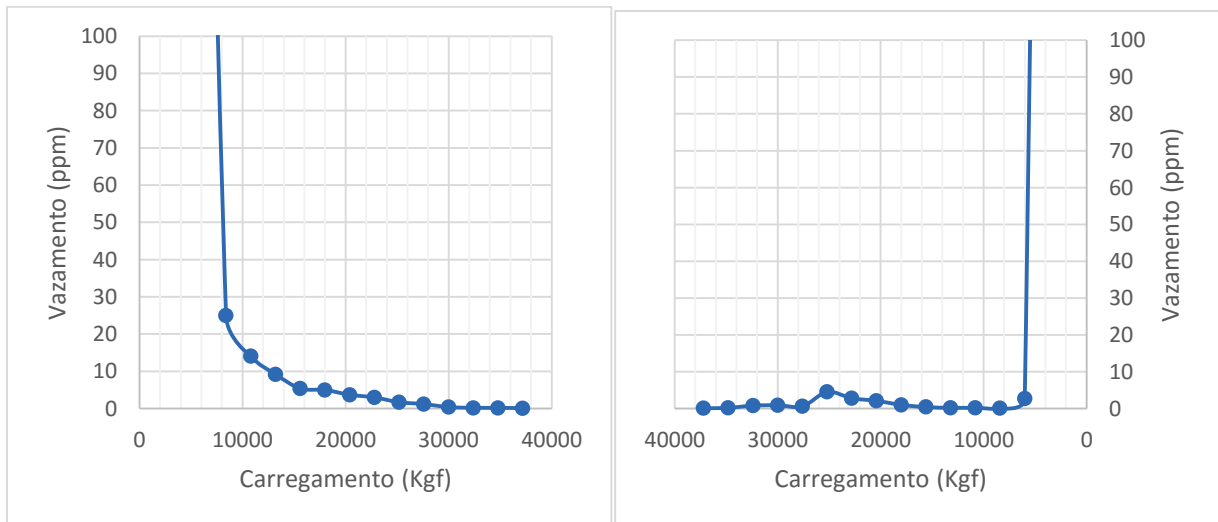


Figura 41 - Ensaio de Vedação do Anel B2, durante aperto (à esquerda) e afrouxamento (à direita).

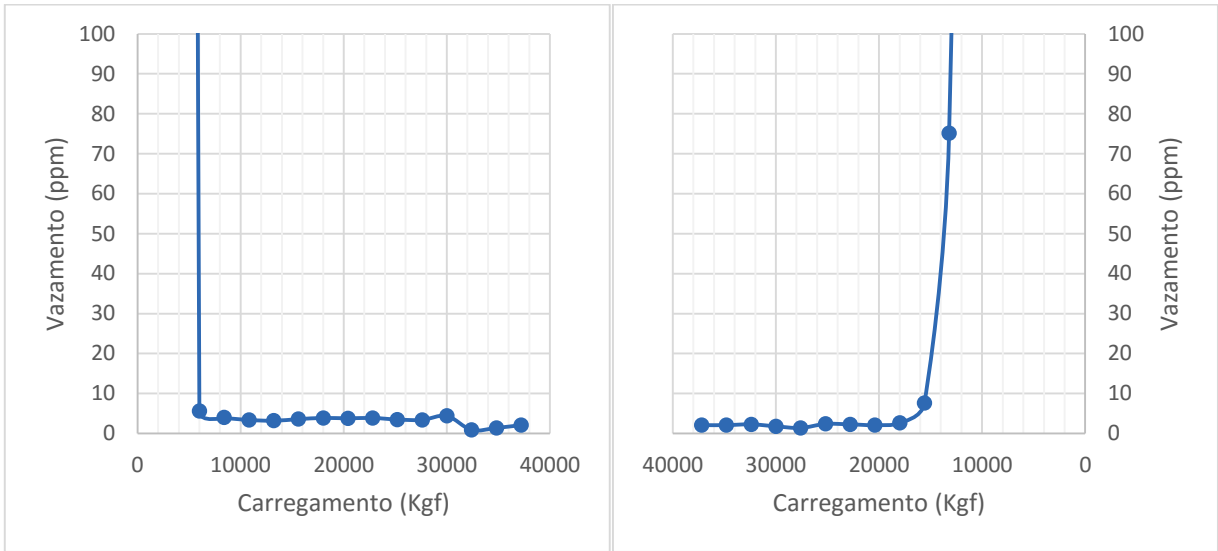


Figura 42 - Ensaio de Vedação do Anel B3, durante aperto (à esquerda) e afrouçamento (à direita).

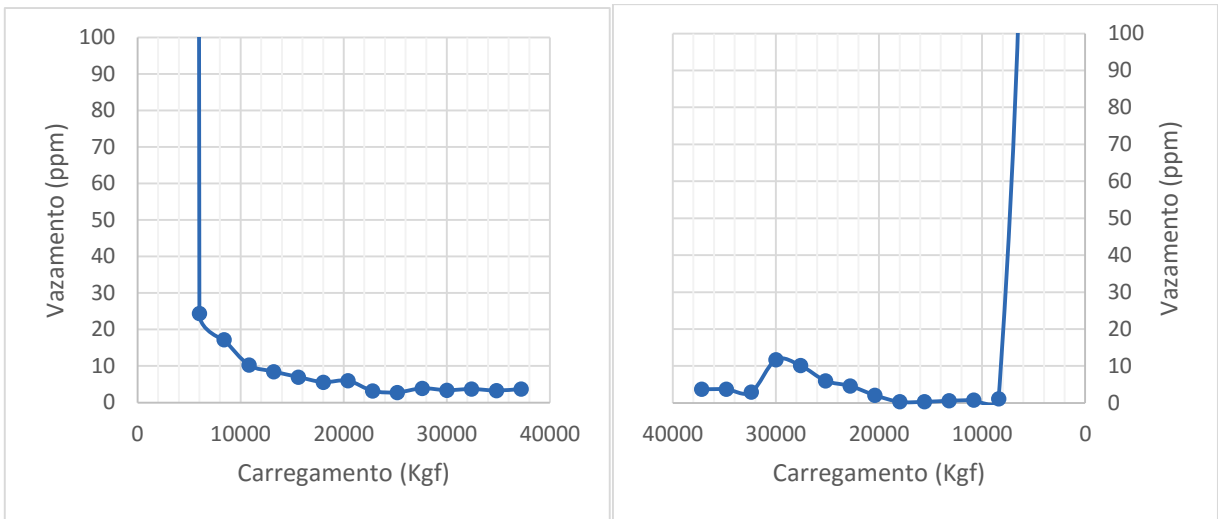


Figura 43 - Ensaio de Vedação do Anel B4, durante aperto (à esquerda) e afrouçamento (à direita).

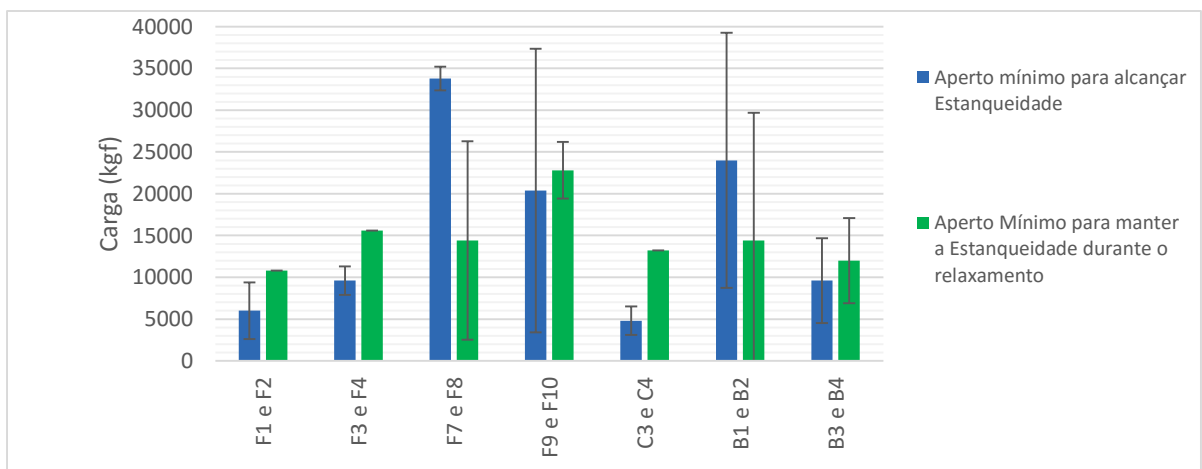


Figura 44 - Compilado de informações dos ensaios de estanqueidade, considerando médias e desvios padrão dos anéis duplicados.

4.7. Dimensionamento dos flanges e anéis testados

As Figuras 45 a 58 apresentam os resultados da medição por meio de laser das dimensões dos canais dos flanges e superfície dos anéis depois que os testes de vedação terminaram. Em cada figura, à esquerda encontram-se os canais dos flanges e à direita os anéis. É possível observar o perfil original da peça e o perfil após o ensaio de vedação. No caso dos flanges, as faces de contato do canal são originalmente retas, logo as linhas que aparecerem com curvatura de amassamento são as que foram obtidas após os testes. Já no caso dos anéis, as regiões que sofreram escoamento estão marcadas em cinza, bem como as regiões que foram deformadas em compressão estão avermelhadas.

Os valores de máxima deformação linear foram levantados, para cada conjunto testado, e a tabela 11 apresenta um resumo das deformações (em mm) ocorridas no flange e no anel, juntamente com os valores de dureza obtidos em cada combinação. Nesta tabela o valor de dureza está em HRB mas cabe ressaltar que a dureza HRB máxima é 100 e a dureza do flange de aço martensíticos supera o máximo valor da escala.

Tabela 11 – Compilado de dureza e deformação dos conjuntos testados.

ANÉIS		Dureza (HRB)	Deslocamento (mm)	Deslocamento (mm)	Dureza (HRB)	FLANGES		
Fundidos	F1	72	0,278	0,000	110*	MA1	Martensítico	
	F2	73	0,250	0,000	110*			
	F3	71	0,140	0,153	73	MB1	Aço C.	
	F4	72	0,139	0,157	73			
	F7	71	0,231	0,163	84	MC1-1	Aço Inox. Austenítico	
	F8	69	0,219	0,139	84			
	F9	72	-	0,153	82	MC2-1		
	F10	73	0,173	0,129	81	MC2-2		
	Chapa	C3	81	0,082	0,189	73	MB3	Aço C. Recozido
		C4	79	0,106	0,190	74		
Barra	B1	72	0,258	0,000	110*	MA1	Martensítico	
	B2	72	-	0,000	110*			
	B3	72	0,231	0,144	73	MB5	Aço C. Recozido	
	B4	72	0,204	0,130	74			MB6

*Dureza obtida em 39HRC sendo convertida com aproximação segundo ASM.

Um resultado muito relevante verificado nestes testes é o fato de que todos os flanges que não eram de aço martensítico apresentaram deformação após os testes de vedação, o que levanta uma bandeira vermelha em relação à possibilidade de danificar o flange durante o aperto do anéis ovais, pois flanges com estas características podem existir em operação.

Constatou-se que as maiores deformações para o canal do flange, juntamente com as menores deformações para o anel, ocorrem para os conjuntos flange de aço carbono recozido com anéis de chapa laminada C3/MB3 e C4/MB4. É possível entender esse fenômeno devido a estrutura mais refinada encontrada nas chapas laminadas ao maior expoente de encruamento que permite que o material endureça muito rapidamente com tensões ainda baixas.

Quando se comparam os anéis F3, C3 e B3, assim como suas duplicatas, observa-se maiores deformações no canal do flange quando se usa anéis originados de chapas, seguido por fundidos e barras.

Nota-se também que na combinação de anéis e flanges, ambos em aço inoxidável austenítico (F7 e F8), na qual os flanges possuíam dureza bem superior, ocorreu grande deformação dos anéis e significativa deformação dos canais dos flanges. Neste caso, tratava-se de materiais similares que não possuem grande diferença para valores dos limites de escoamento, logo para intensos níveis de tensão ambos escoam sem dificuldade.

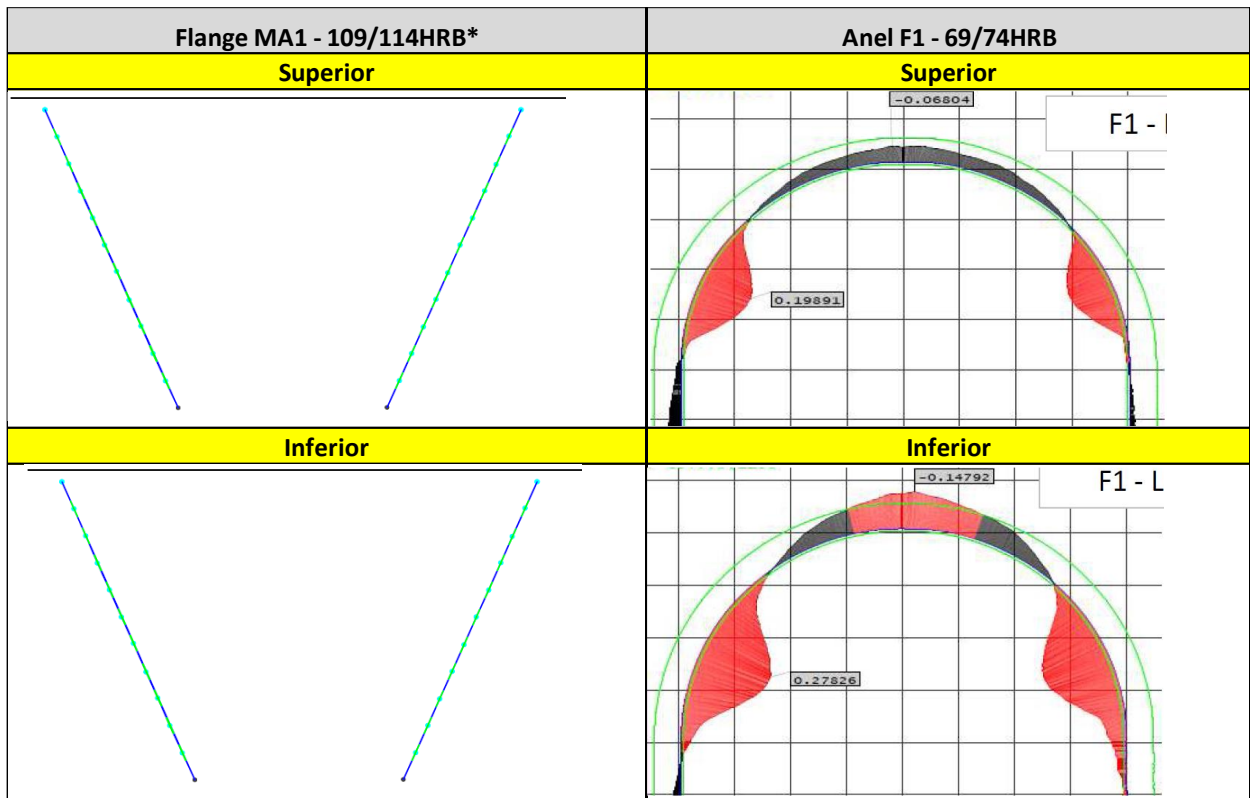


Figura 45 - Medição do conjunto F1 - MA1.

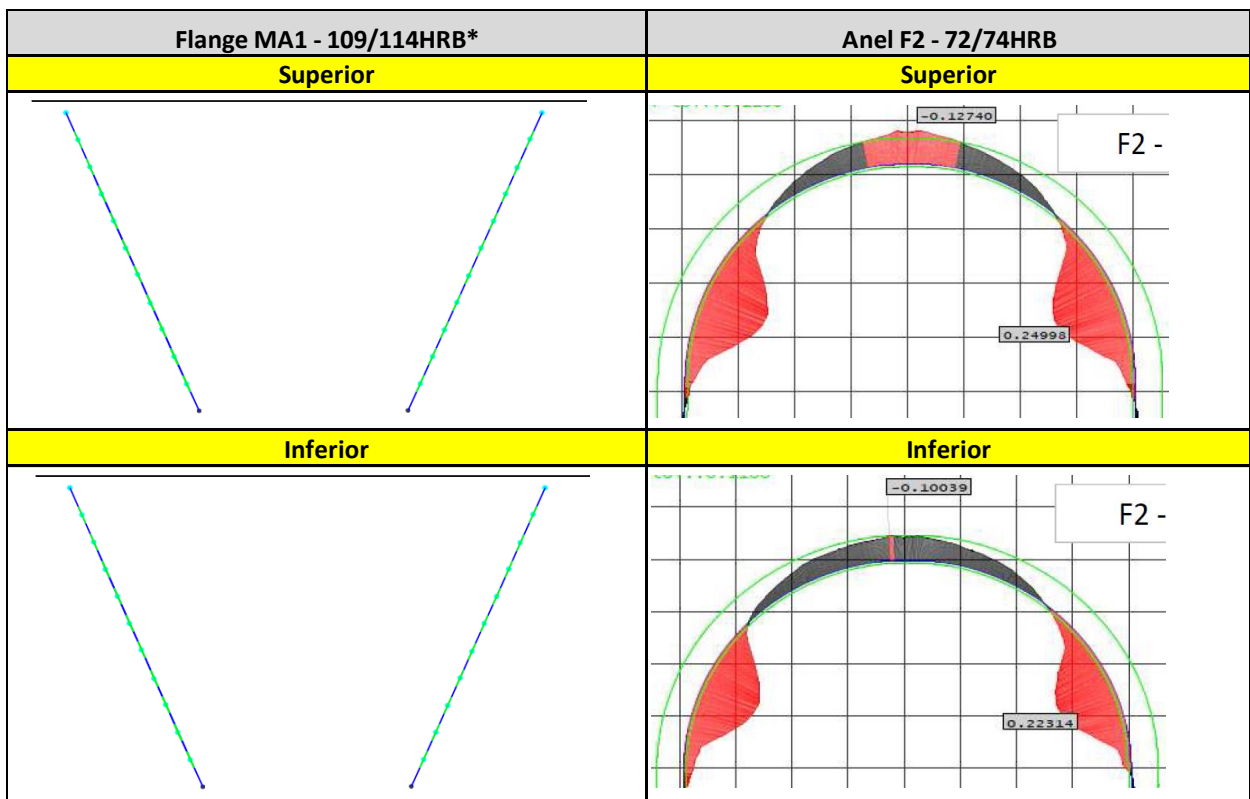


Figura 46 - Medição do conjunto F2 – MA1.

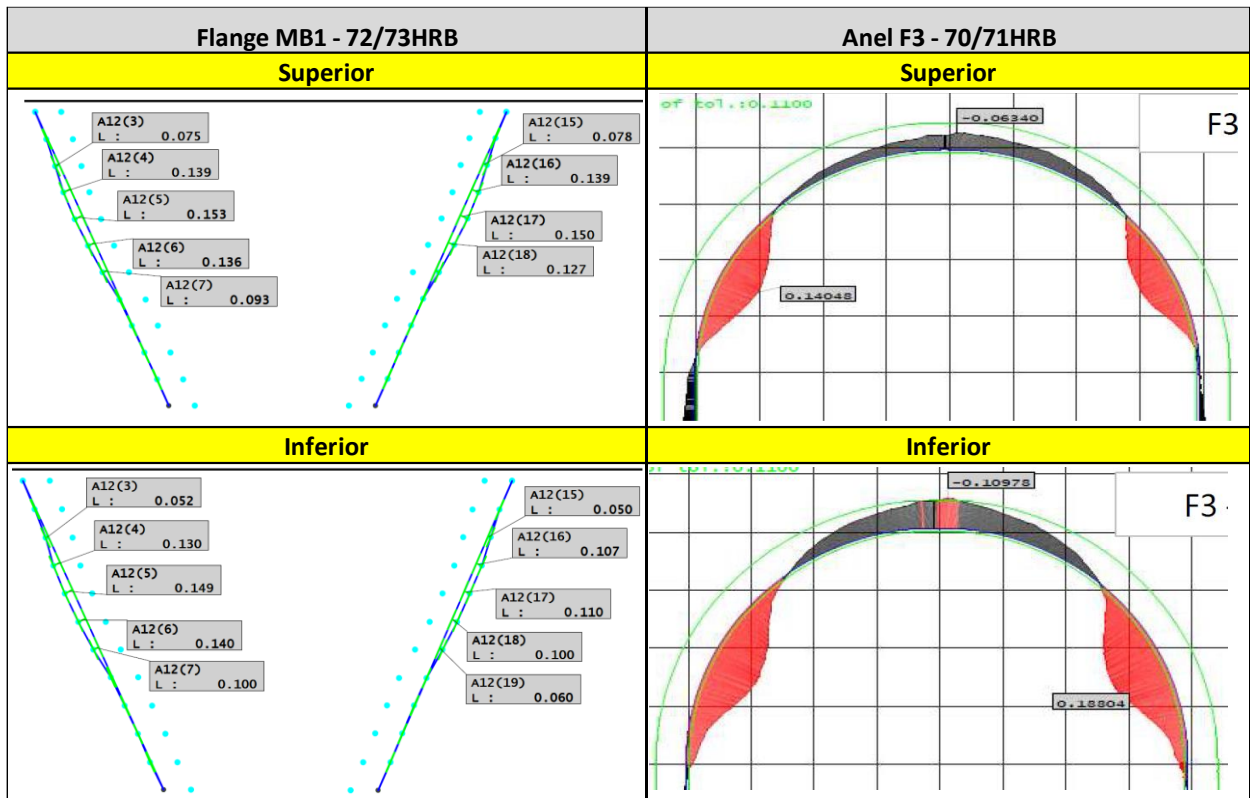


Figura 47 - Medição do conjunto F3 – MB1.

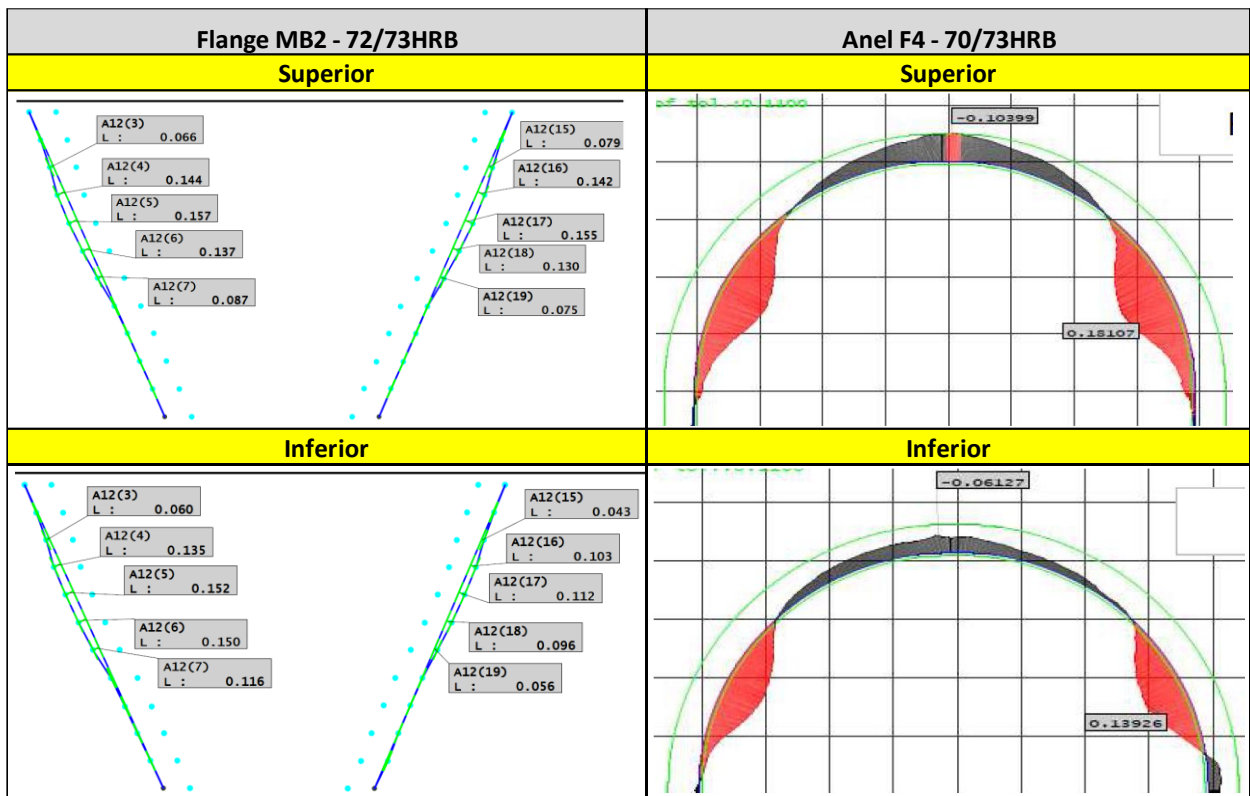


Figura 48 - Medição do conjunto F4 – MB2.

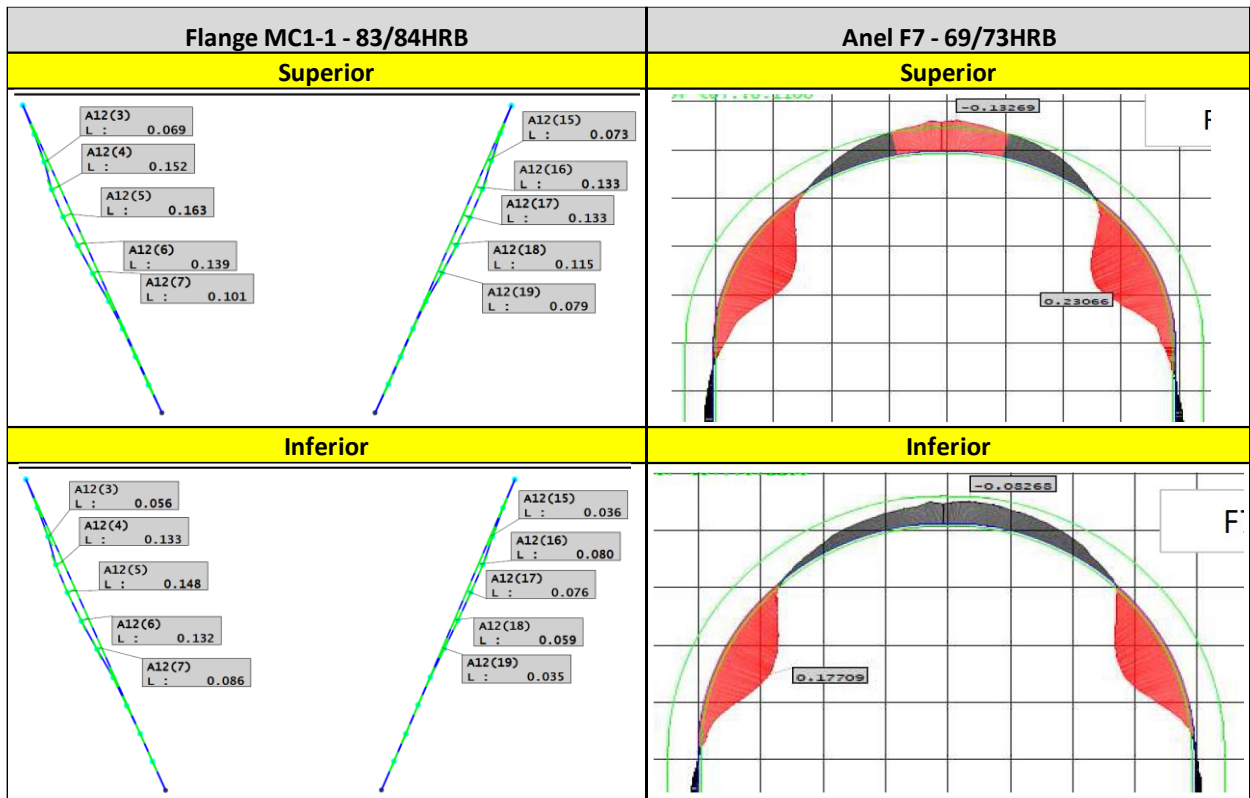


Figura 49 - Medição do conjunto F7 – MC1-1.

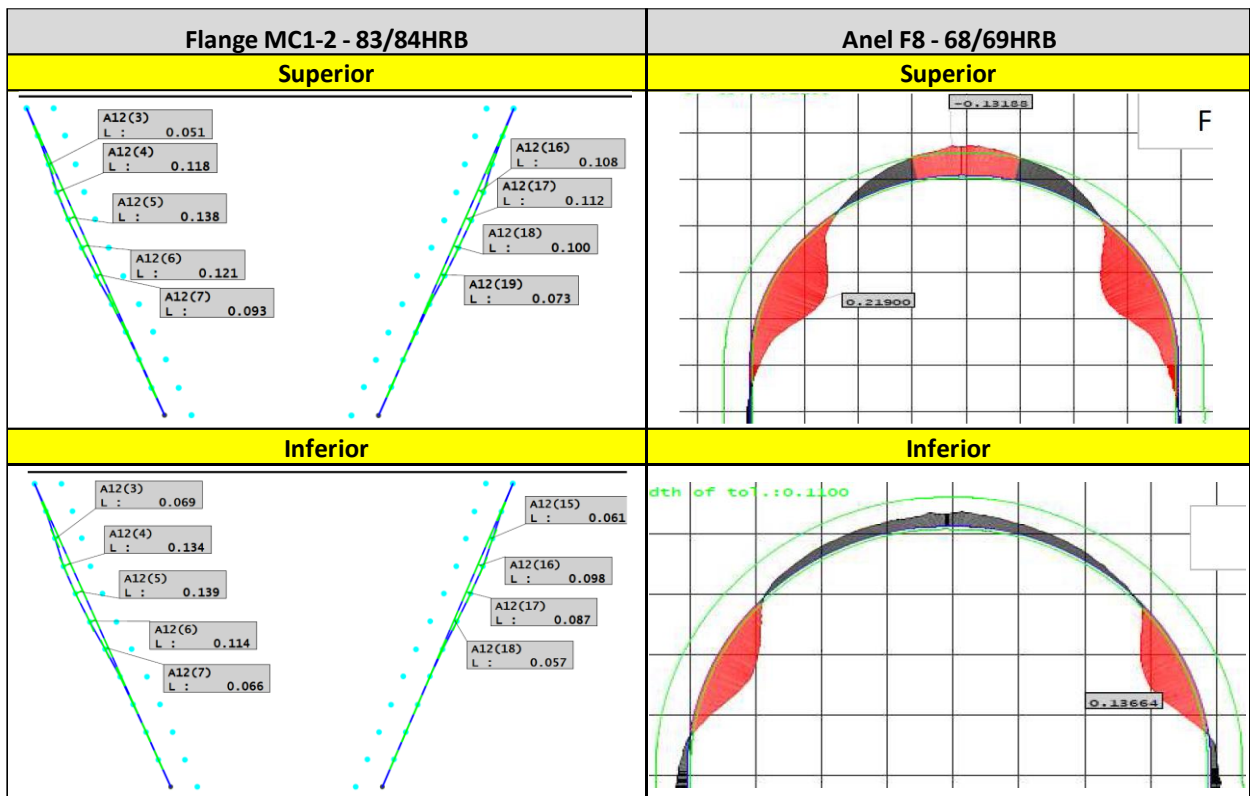


Figura 50 - Medição do conjunto F8 – MC1-2.

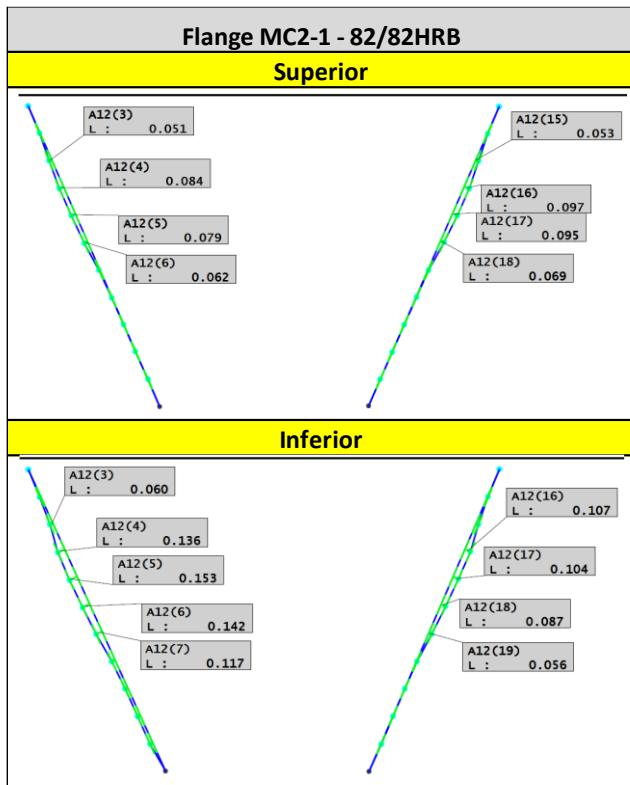


Figura 51 - Medição apenas do flange MB1-2, pois o resultado do anel F9 não ficou pronto em tempo para este projeto.

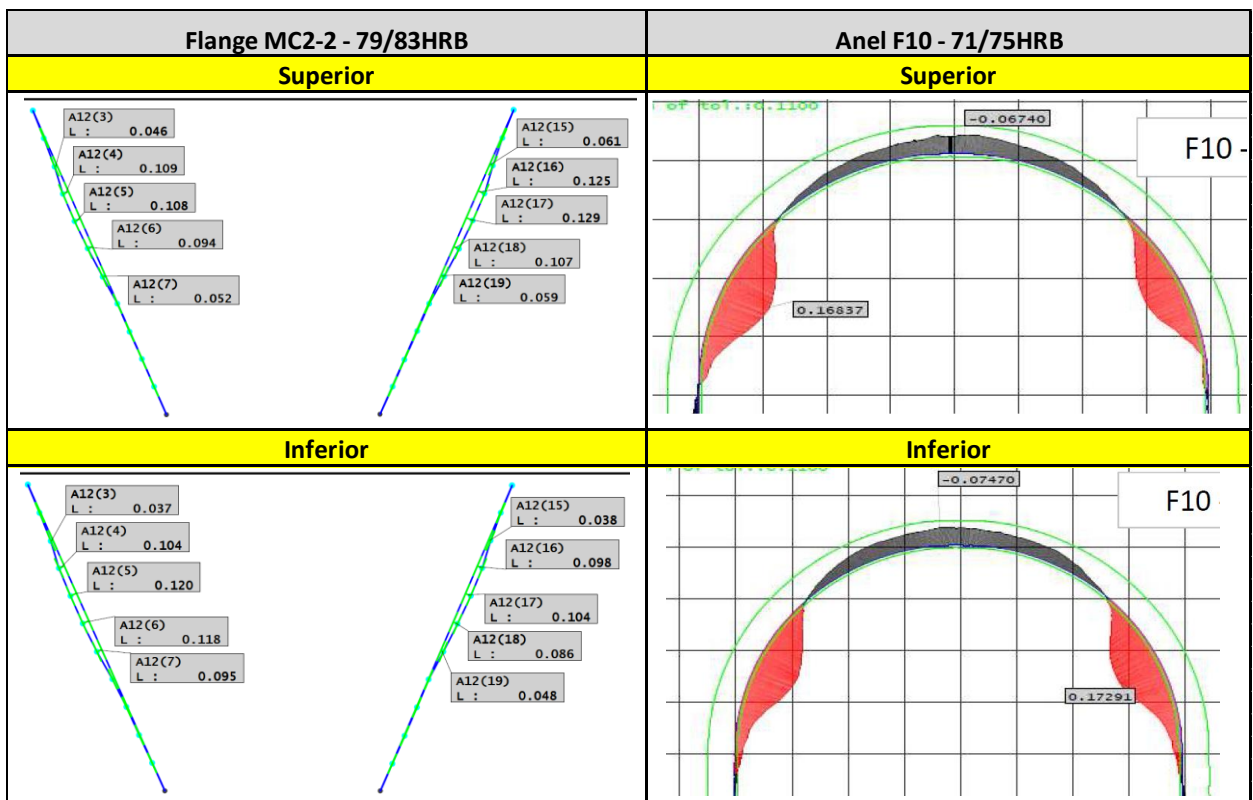


Figura 52 - Medição do conjunto F10 - MC2-2.

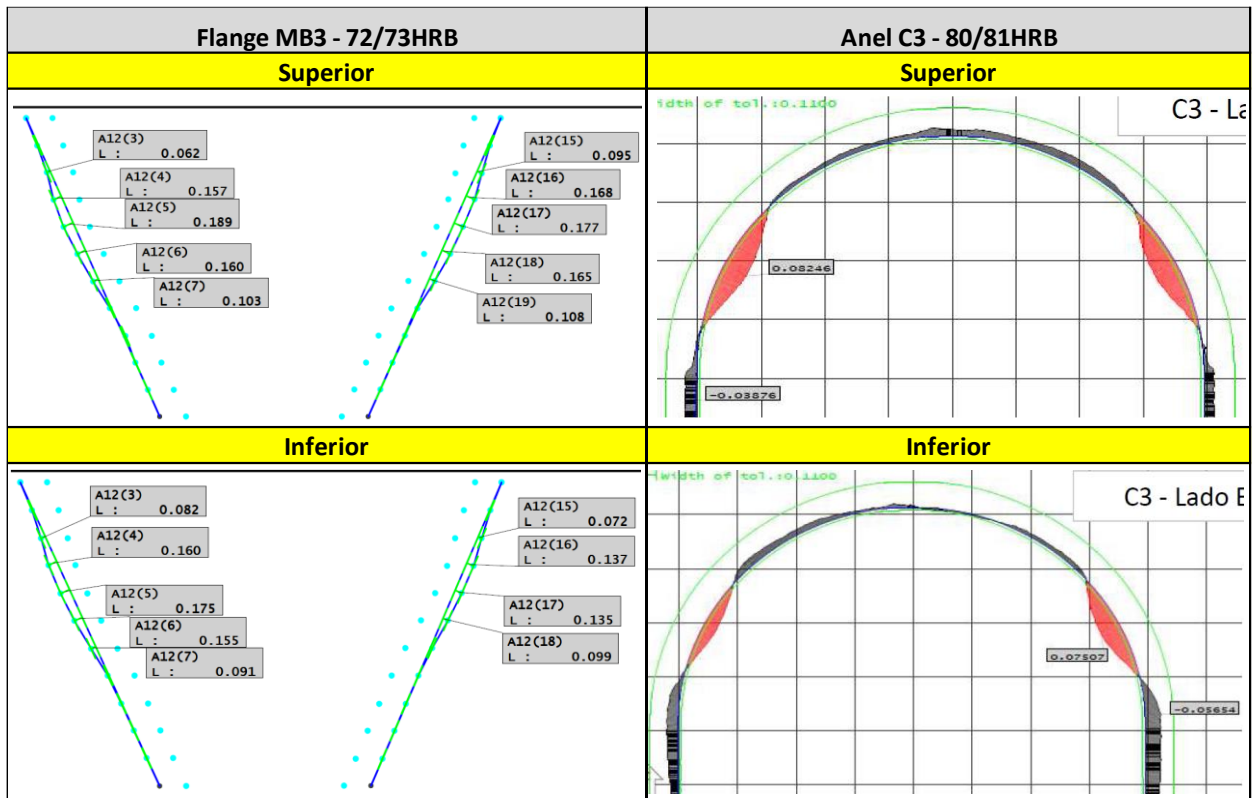


Figura 53 - Medição do conjunto C3 – MB3.

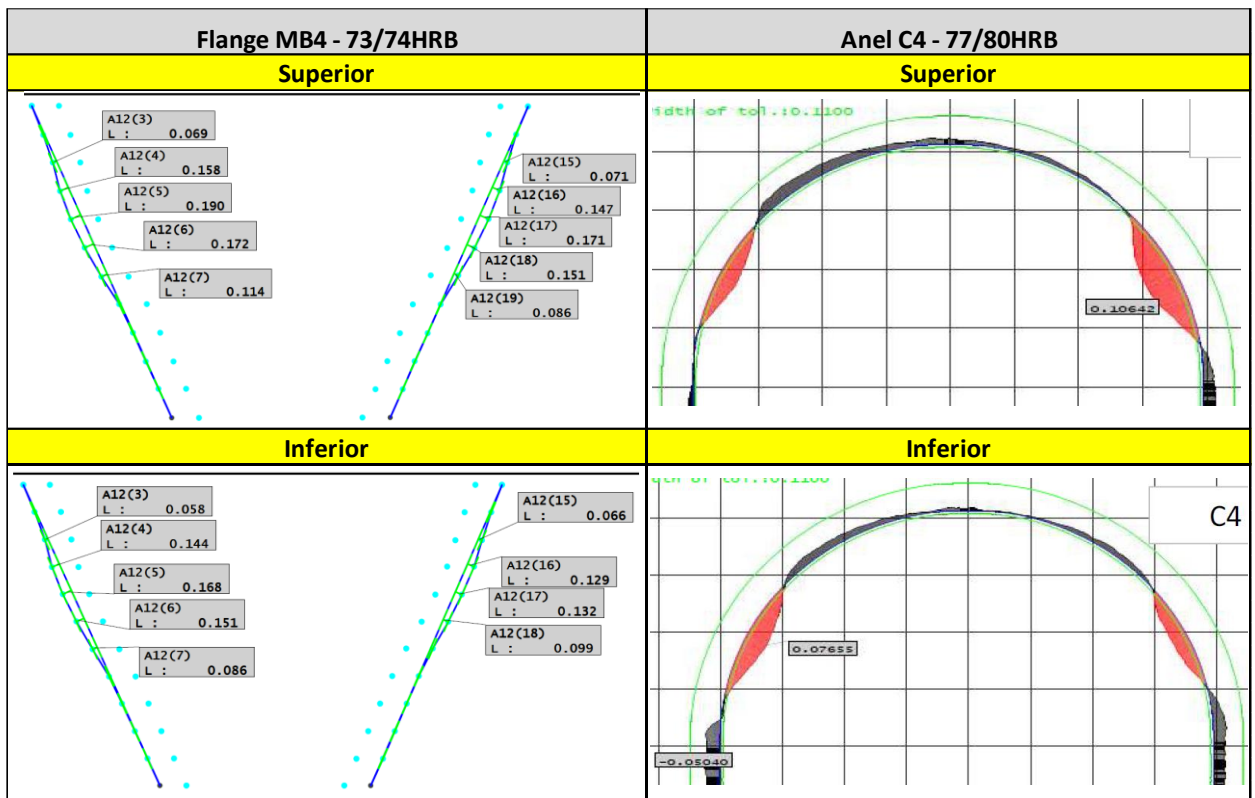


Figura 54 - Medição do conjunto C4 – MB4.

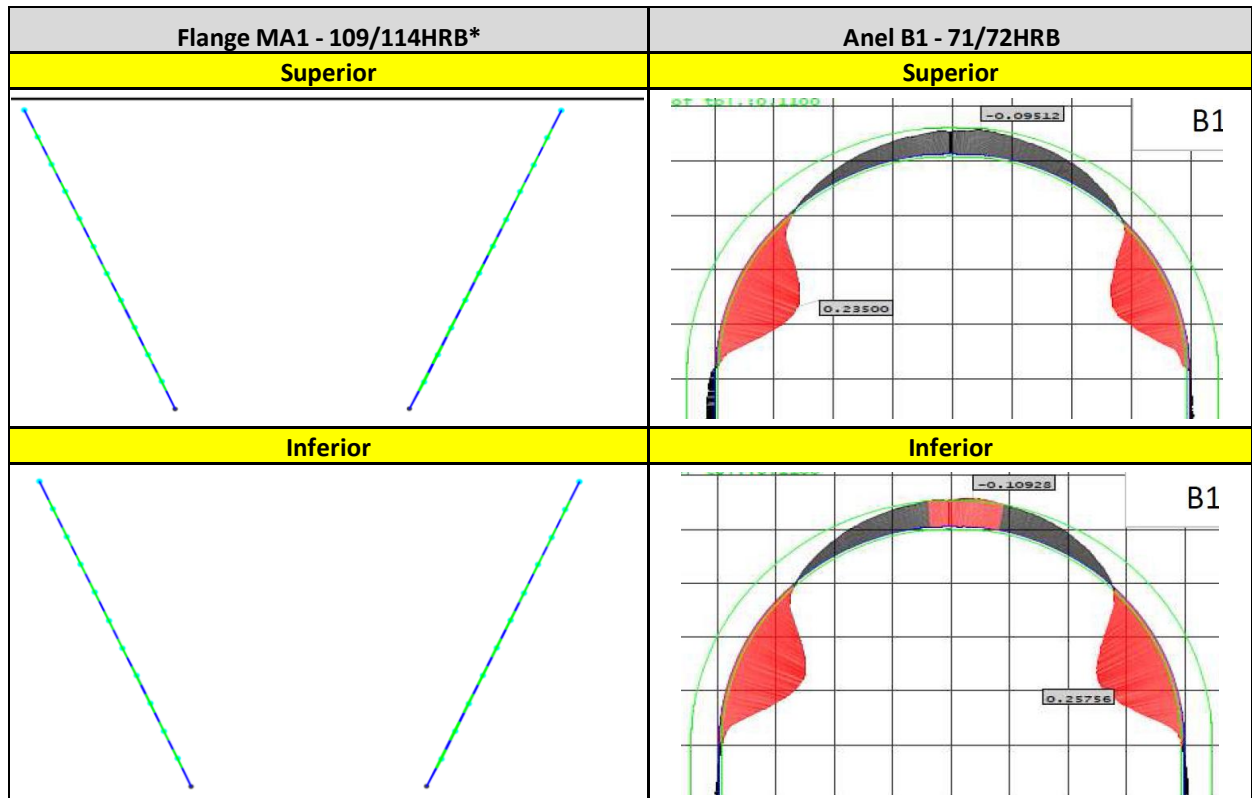


Figura 55 - Medição do conjunto B1 - MA1.

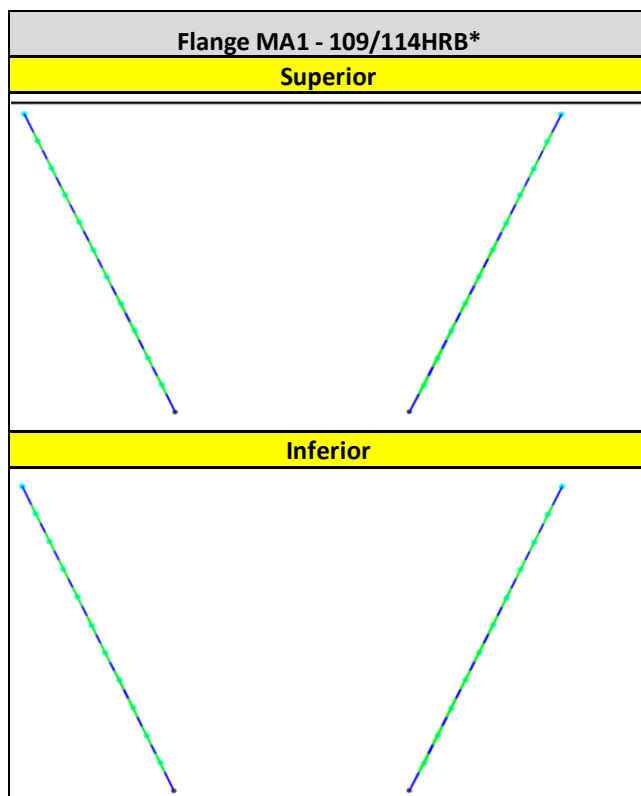


Figura 56 - Medição apenas do flange MA1, pois o resultado do anel B2 não ficou pronto em tempo para este projeto.

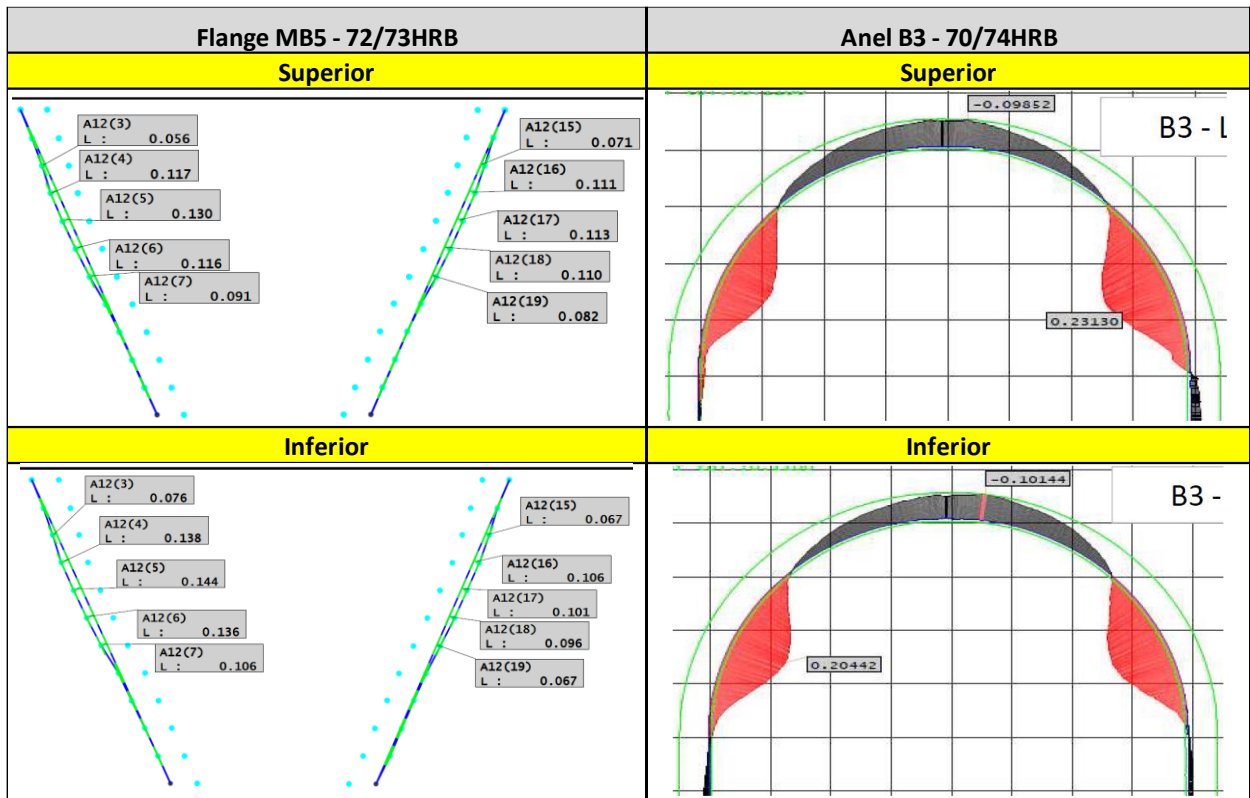


Figura 57 - Medição do conjunto B3 – MB5.

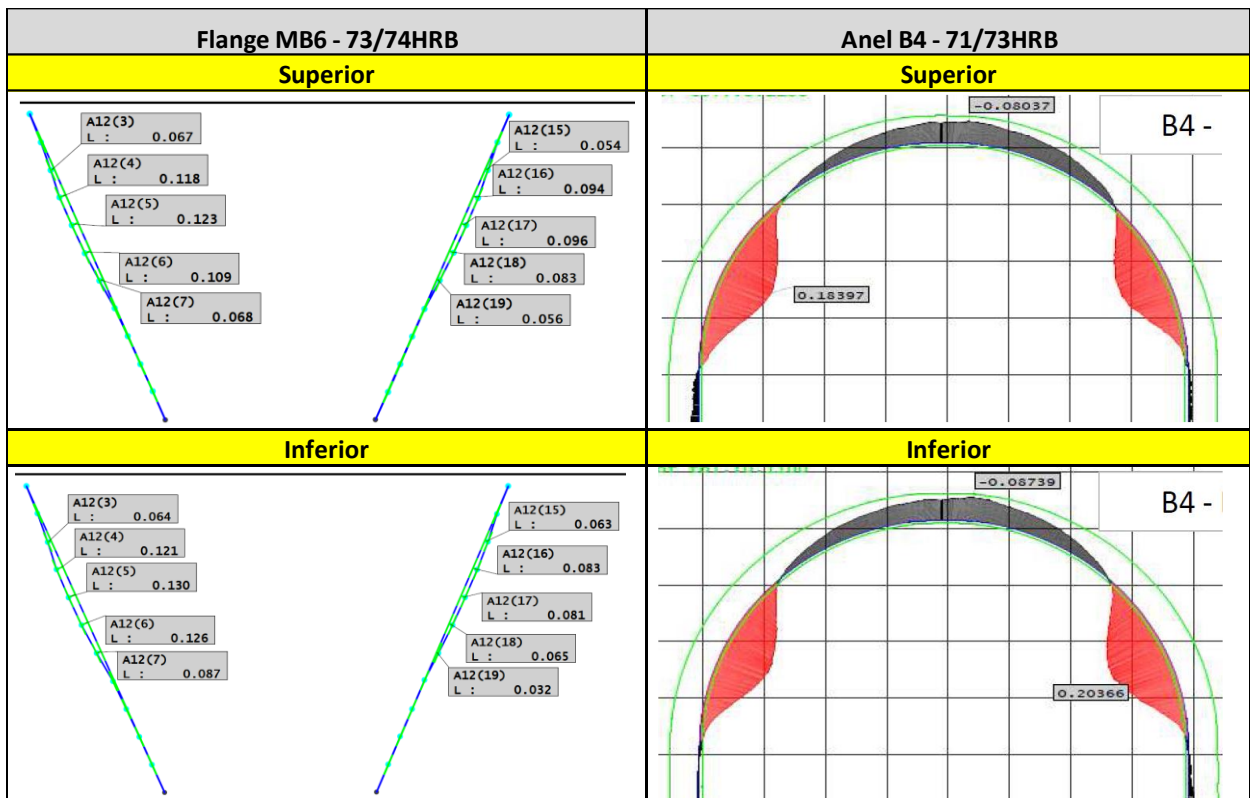


Figura 58 - Medição do conjunto B4 – MB6.

5. Discussão

Os resultados obtidos neste trabalho mostraram que realmente deve existir uma preocupação com as características metalúrgicas dos anéis de vedação, pelo menos para anéis ovais onde o contato entre o anel e a face do flange é pequeno e pode causar uma tensão local muito alta e deformação localizada.

Os ensaios de vedação feitos em anéis que atendiam todos à mesma especificação, mas tinham diferentes rotas de processamento fabril e que foram testados em conjuntos diferentes, mostraram uma variação muito grande na carga de aperto para alcançar a estanqueidade e em alguns casos a carga se mostrou muito próxima à recomendada para fechar os flanges (aperto dos parafusos), o que pode significar que qualquer relaxamento no conjunto poderia causar o vazamento da conexão.

Estas diferenças podem estar relacionadas com as microestruturas diferentes, que promovem comportamentos mecânicos totalmente diferentes, como se pode ver ao sobrepor as curvas de tração de cada tipo de material, Figura 59, onde um material fundido de estrutura mais grosseira inicia a deformação em mais baixa tensão e uma chapa de grão mais fino e com textura (promovida pela ferrita delta alinhada) consegue endurecer mais e atingir maior tensão limite de resistência (com maior dureza). Mas estas diferenças também podem estar relacionadas com as combinações adotadas neste trabalho para avaliar anéis e flanges de diferentes durezas.

A Figura 60 resume combinações e resultados obtidos neste trabalho. Nesta figura estão apresentados os resultados de deformações para anéis e flanges (sendo que a figura cheia mostra muita deformação e a figura vazia mostra pouca ou nenhuma deformação) e a combinação entre a dureza do anel (no eixo Y) e a dureza do flange (no eixo X).

Para melhor discussão dos resultados, os diferentes conjuntos foram separados em quatro grupos, que podem ser resumidos como:

- A – anéis macios testados em flanges muito duros onde toda a deformação foi imposta ao anel.
- B – anéis duros testados em flanges macios, que causaram grande deformação no flange.
- C – anéis e flanges de durezas próximas mas de materiais diferentes.
- D – anéis de durezas diferentes testados em flanges de aço carbono.

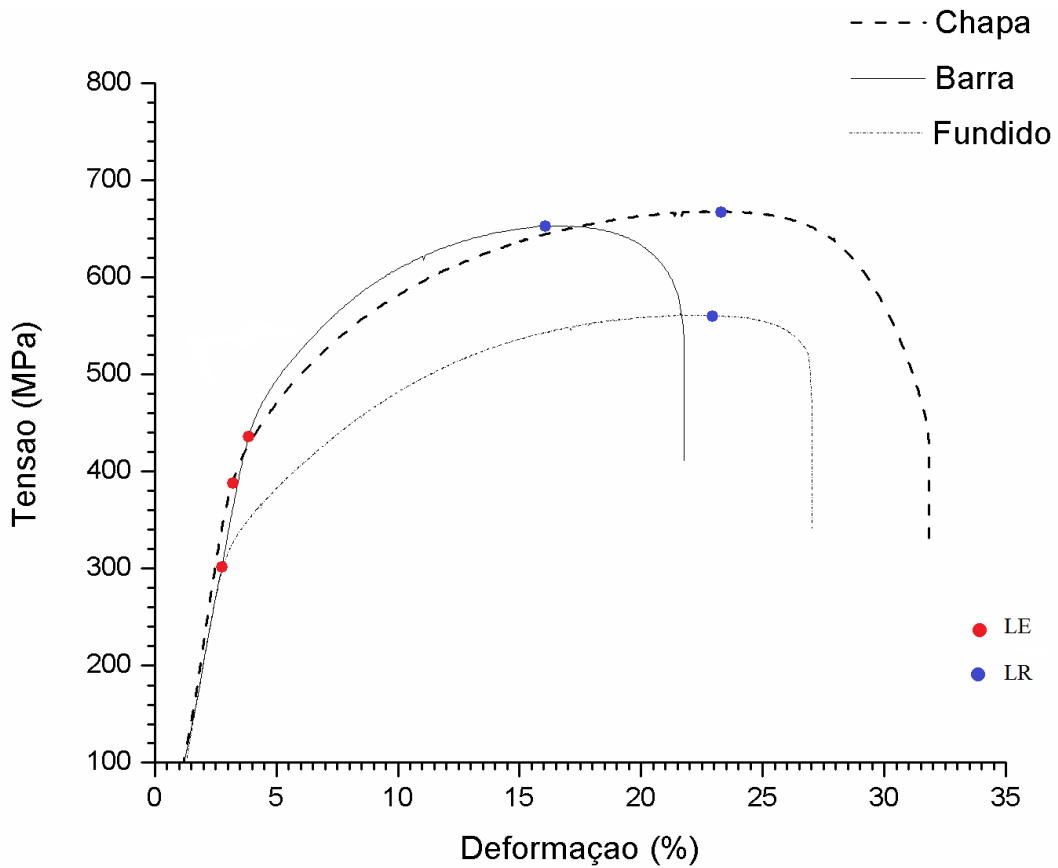


Figura 59 - Curvas de ensaios de tração sobrepostas.

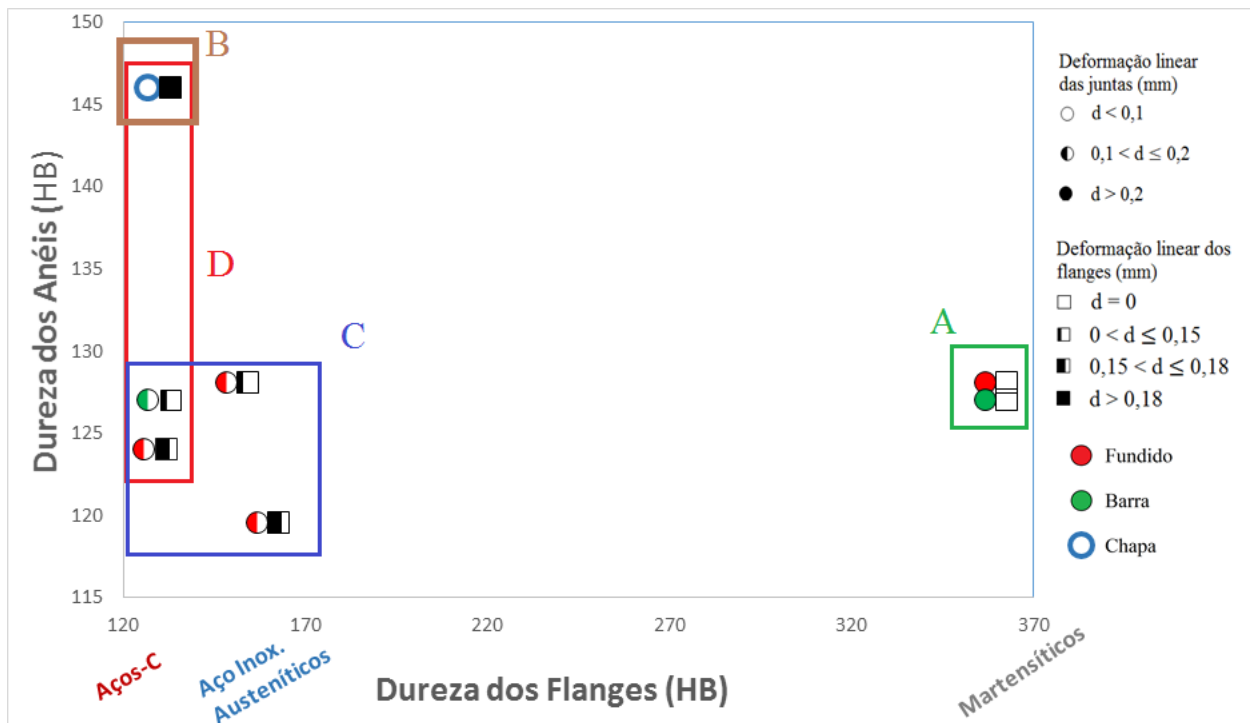


Figura 60 - Gráfico esquemático de dureza dos anéis x dureza dos flanges, apresentando simbologia para comparar níveis de deformação em cada caso.

Para ilustrar graficamente as diferenças encontradas entre as diferentes condições foi montada a Tabela 12 que apresenta, além dos valores obtidos diretamente nos testes de vedação (carga de aperto para alcançar a estanqueidade e para manter a estanqueidade) e dimensional (máxima deformação linear no anel e no flange), algumas combinações entre resultados e estimativas de tensão limite de escoamento de cada anel, com base na relação LE/LR obtida para cada condição, e para cada flange adotando relações LE/LR de 0,9 para um aço martensítico; LE/LR 0,75 para um aço C ferrítico/perlítico e LE/LR de 0,65 para um aço inox.

Tabela 12 – Conjunto de valores medidos e estimados para geração de gráficos.

ID	Dureza do anel (HB)	LE estimado (Mpa)	Dureza do flange (HB)	LE estimado (MPa)	Diferença de dureza (HB)	Diferença de LE (MPa)	Aperto para alcançar a estanqueidade	Aperto para manter a estanqueidade	Deformação do anel (mm)	Deformação do flange (mm)	Deformação do conjunto (mm)	GRUPO
F1	127	233	360	1231	233	998	3600	10800	0,278	0	0,278	A
F2	129	237	360	1231	231	995	8400	10800	0,25	0	0,25	A
F3	121	222	129	348	8	126	8400	15600	0,14	0,153	0,293	D
F4	127	233	129	348	2	115	10800	15600	0,139	0,157	0,296	D
F7	121	222	160	374	39	152	34800	6000	0,231	0,163	0,394	C
F8	118	216	160	374	42	158	32800	22800	0,219	0,139	0,358	C
F9	127	233	154	360	27	127	32400	20400	0,173	0,153	0,326	C
F10	129	237	149	349	20	112	8400	25200	0,173	0,129	0,302	C
C3	149	289	129	348	-20	59	3600	13200	0,082	0,189	0,271	B,D
C4	143	278	131	354	-12	76	6000	13200	0,106	0,19	0,296	B,D
B1	127	309	360	1231	233	922	34800	25200	0,258	0	0,258	A
B2	127	309	360	1231	233	922	13200	3600	0,258	0	0,258	A
B3	127	309	129	348	2	39	6000	15600	0,231	0,144	0,375	C,D
B4	127	309	131	354	4	45	13200	8400	0,204	0,13	0,334	C,D

O primeiro gráfico de “aperto para alcançar a estanqueidade x deformação nos anéis”, Figura 61, mostra que para atingir a estanqueidade não é necessário que haja grande deformação no anel, ou seja, aquela ideia de que é necessário deformar muito para garantir a estanqueidade não se mostrou válida. Além disso, mostra nitidamente que os grupos apresentados na Figura 60 tem comportamentos diferenciados.

O grupo A (F1, F2, B1 e B2) de flanges duros em anéis macios promoveu grande deformação nos anéis, como seria esperado, mas esta deformação não está relacionada com a carga para alcançar a estanqueidade.

O grupo B (C3 e C4) de anéis mais duros que os flanges, promoveu pequena deformação nos anéis e vedou rapidamente, mas isto pode significar que vedou porque o flange também deformou, como foi constatado e está ilustrado na Figura 62.

Para o grupo C (F7, F8, F9, F10, B3 e B4), onde todos têm mais ou menos a mesma combinação entre durezas, constata-se a forte tendência de exigir maiores apertos para o contato entre materiais similares, flanges austeníticos e anéis austeníticos (F7, F8, F9), o que pode significar que neste caso esteja havendo uma adesão e esta seja responsável por promover uma vedação ruim. É preciso, portanto, alertar que vedações entre materiais similares (inox x inox) não é recomendada e esta é a razão porque flanges para meio corrosivo e altas pressões precisam de solda (de Inconel) nos canais de assentamento de anéis metálicos.

Finalmente para o grupo D (C3, C4, F3, F4, B3 e B4), onde anéis de diferentes durezas sofreram aperto no mesmo tipo de flange, de aço ao carbono, constata-se que existe uma tendência do aperto para alcançar estanqueidade estar associado a maiores deformações nos anéis. Ao abrir este gráfico da Figura 60 adicionando as deformações nos flanges, Figura 62, pode-se perceber que de fato os anéis que menos se deformam são aqueles que asseguram a vedação em mais baixas cargas, mas causam as maiores deformações nos flanges.

Pensando ainda nas recomendações de que uma dureza do flange 30 HB superior à do anel asseguraria melhor vedação, também não existem evidências de que esta afirmativa esteja correta, como se pode ver na Figura 63, onde valores muito altos de diferença de dureza tiveram comportamentos totalmente diferentes (grupo A – B1, B2, F1 e F2).

Se forem analisados mais profundamente os anéis testados no grupo D, no gráfico de aperto para alcançar a estanqueidade x diferença entre tensões limite de escoamento (flange e anel), Figura 64; constata-se que existe uma relação sim, mas ao contrário do que seria esperado, quanto maior a diferença entre as tensões limite de escoamento maiores são as cargas para vedar, o que mostra que materiais que deformam mais podem não ter tanta facilidade assim para vedar. Estes fenômenos podem estar relacionados com o possível escoamento descontrolado de ambos os componentes (anel e flange), ao mesmo tempo,

permitindo a abertura de espaços para o vazamento, sugerindo que uma tensão elástica maior poderia favorecer a vedação.

Cabe ressaltar que todos estes testes foram realizados em anéis ovais e de pequenas dimensões, mas não foi realizada nenhuma análise na relação entre as áreas de contato no aperto, que poderiam influenciar muito no comportamento do material, de forma que não é possível extrapolar estas tendências para anéis octogonais ou de maiores dimensões.

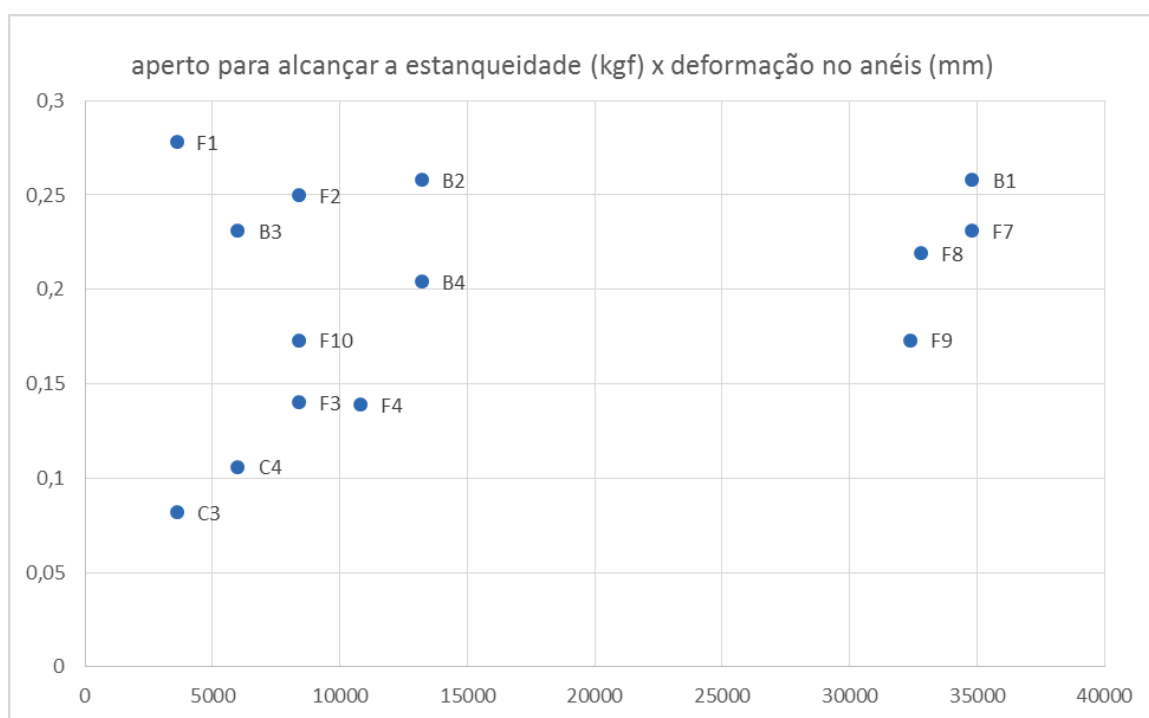


Figura 61 - Gráfico de aperto para alcançar a estanqueidade x deformação nos anéis

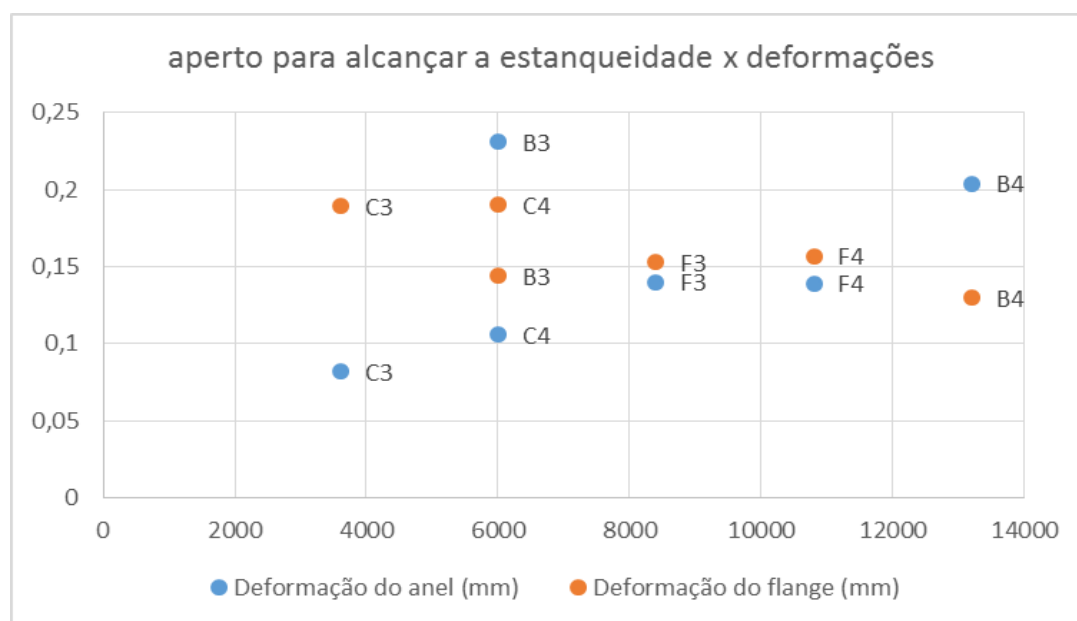


Figura 62 - Gráfico de aperto para alcançar a estanqueidade x deformações

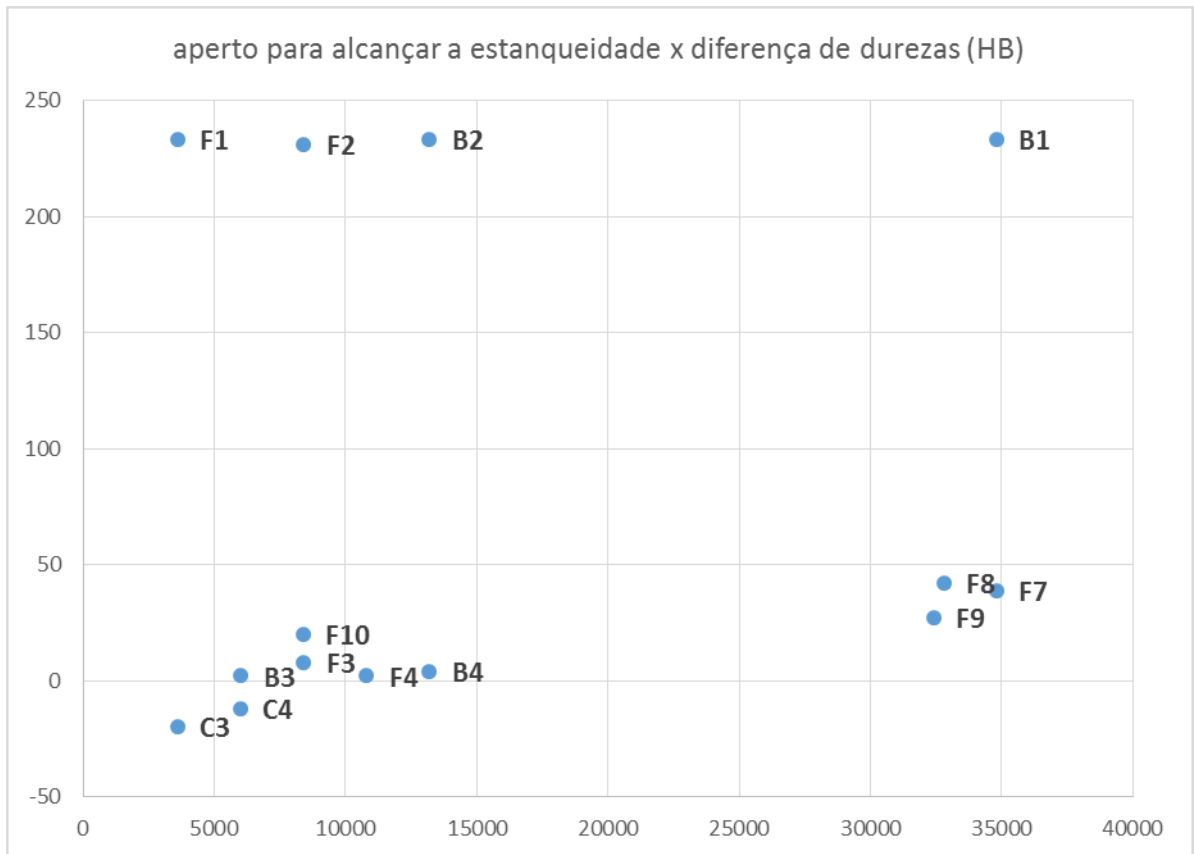


Figura 63 - Gráfico de aperto para alcançar a estanqueidade x diferença de durezas entre anéis e flanges.

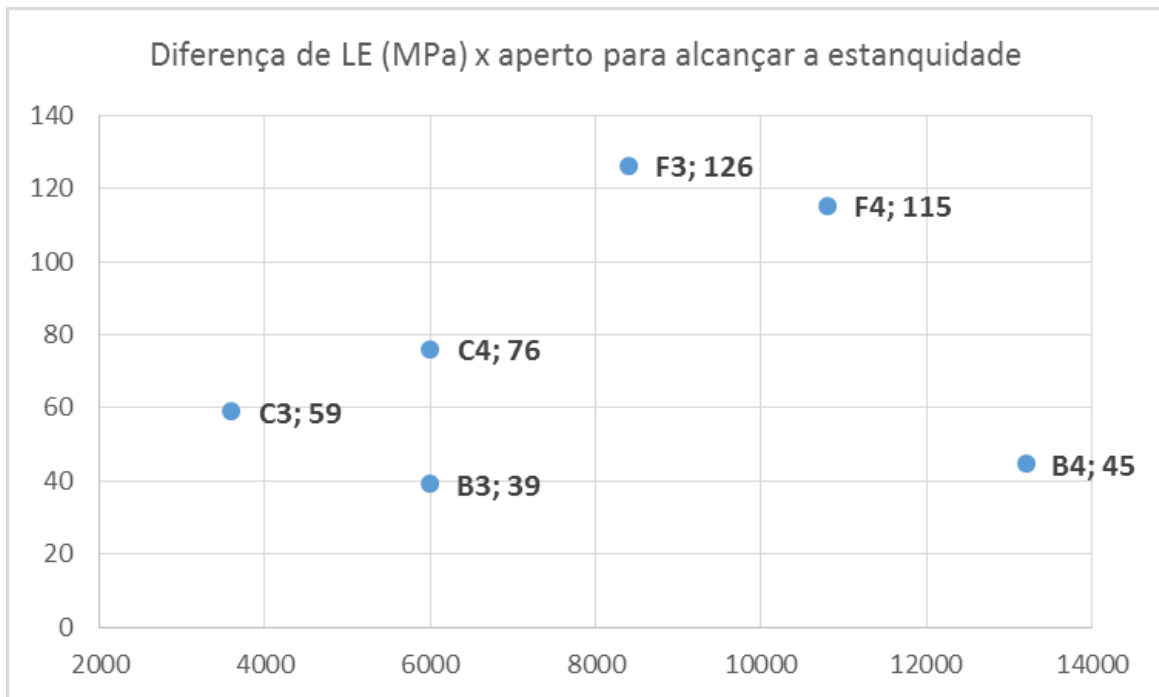


Figura 64 - Diferença de limite de escoamento x aperto para alcançar a estanqueidade

6. Conclusões

Este estudo foi conduzido em anéis fabricados a partir de matérias-primas processadas de forma diferente, fundidas, laminadas ou forjadas; e os resultados mostraram que suas características microestruturais e de comportamento mecânico, principalmente no regime plástico, são muito diferentes e podem ser responsáveis pelas grandes diferenças no comportamento em vedação destes anéis, inclusive favorecendo vazamentos.

Os anéis fabricados a partir de chapas laminadas são os mais críticos com relação à deformação dos canais dos flanges, tendo sido os que causaram maior amassamentos destes. Porém, além de terem sido os que sofreram a menor deformação, também foram os que tiveram o melhor desempenho na vedação.

Somente nos casos em que o flange era muito mais duro que o anel se evitou o amassamento do canal do flange.

Definir pequenas diferenças de dureza (abaixo de 50 HB) entre o canal do flange e o anel não previne danos ao flange.

Aconselha-se evitar o uso de anéis de aço inoxidável austenítico ovais, tipo R-16, conjugados com flanges de mesmo material ou de aço carbono ferrítico-perlítico. Ou então que se estude a viabilidade de execução de algum procedimento endurecimento das faces de contato dos canais dos flanges.

A deformação plástica do anel dentro do canal do flange não parece auxiliar o processo de vedação, pois os melhores resultados foram obtidos com os anéis que pouco se deformaram, e os piores com os que muito se deformaram.

Deixa-se como sugestão para projetos futuros, o estudo dos octogonais para os mesmos materiais aqui estudados e com a aplicação de análise de elementos finitos.

7. Referências Bibliográficas

- [1] P. C. S. Telles, **Materiais para Equipamentos de Processo**, 4^o ed., Rio de Janeiro, RJ: Editora Interciência, 1989.
- [2] P. C. S. Telles, **Tubulações Industriais - Materiais, Projeto, Montagem**, 10^o ed., São Paulo, SP: Editora Cromosete, 2008.
- [3] Wenzhou Bangda Pipe Fittings Manufacturing Co, "BD Pipe. [S.I.]," Wenzhou Bangda Pipe Fittings Manufacturing Co, [Online]. Disponível em:
<http://bdpipe.en.ec21.com/RTJ_Flange--3808218_5009338.html>. [Acesso em 12 01 2016].
- [4] G. A. Antaki, **Piping and Pipeline Engineering: Design, Construction, Maintenance, Integrity, and Repair**, 1^o ed., Aiken, South Caroline: CRC Press, 2003.
- [5] Iron & Steel Society, **Steel Products Manual: Stainless Steels**, Edição de 2008 ed., Warrendale, PA: ISS Publications, 1999.
- [6] A. Zeemann, **Soldagem em aços inoxidáveis**, Vargem Grande, RJ: TECMETAL Soluções Tecnológicas em Materiais, 2014.
- [7] V. Chiaverini, **Aços e Ferros Fundidos**, 6^o ed., ABM, 2002.
- [8] G. J. Fischer and R. J. Maciag, **Handbook of Stainless Steels**, McGraw-Hill Company, 1977.
- [9] F. B. and J. A. V. T. A. Pruger, "Effects of Residual Elements on Cold Rolling and Finishing of Austenitic Stainless Steel" in *Effects of Residual Elements on Properties of Austenitic Stainless Steels*, Atlantic City, Jul/1967.
- [10] L. S. Mello, "**Estudo de corrosão localizada dos aços inoxidáveis em sistemas de resfriamento industrial**" Rio de Janeiro, 2011.
- [11] Outokumpu Stainless Steel AB, **Handbook of Stainless Steel**, Avesta: Outokumpu Oyj, 2013.
- [12] D. O. Passos, "A influência da ferrita delta em aços inoxidáveis austeníticos forjados," **Revista Escola de Minas**, n^o 63, pp. 57 - 63, jan-mar 2010.
- [13] N. S. and I. Solomon, "Deformation induced martensite in AISI 316 stainless steel," **Revista de Metalurgia**, vol. 46, pp. 121 - 128, mar-abr 2010.
- [14] G. E. Dieter, **Metalurgia mecânica**, 2^o ed., Guanabara Dois S.A., 1981.

- [15] M. Schweiss, "Wikimedia Commons," 12 01 2016. [Online]. Disponível em:
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flanschverbindung_Gasleitung.jpg>.
- [16] American Petroleum Institute, **API 6A - Specification for Wellhead and Christmas**, 20^o ed., ASM, 2010.
- [17] ASME, **ASME B16.20-2008 METALLIC GASKETS FOR PIPING FLANGES,. Ring-Joint, Spiral-wound, and Jacketed**, New York: ASME, 2000.
- [18] G. L. Swales, **Applications of centrifugally-cast alloy piping and pipe fittings in onshore and offshore oil and gas production**, Birmingham, 1989.
- [19] Aperam, "www.aperam.com," Aperam, [Online]. Disponível em:
<http://www.aperam.com/brasil/port/produtos_servicos/carbono_biblioteca.asp>. [Acesso em 16 10 2015].
- [20] ASM, **Metallography and microstructures**, vol. 9, ASM International, 2004.
- [21] S. A. d. Souza, **Ensaio mecânicos de materiais metálicos, Fundamentos teóricos e práticos**, 5 ed., B. Ltda, Ed., São Paulo: Edgar Bl, 1982.
- [22] J. C. Veiga, **Juntas Industriais**, 7a ed., Rio de Janeiro, RJ: Grupo Teadit, 2014.
- [23] ASM, **Properties and Selection - Irons, Steels, and High-Performance Alloys**, vol. 1, ASM International, 1993.
- [24] ASTM, **A 193/A 193M-14 "Standard Specification for Alloy-Steel and Stainless Steel Bolting for High Temperature or High Pressure Service and Other Special Purpose Applications"**, ASTM, 2014.