

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA - CTEC
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE ESTATÍSTICA EM DADOS DE PERFILAGEM COMO SUPORTE À
AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DO REVESTIMENTO DE POÇOS DE
PETRÓLEO**

ANTONIO PAULO AMANCIO FERRO

Trabalho de Conclusão de Curso

Orientador: Prof. Me. Lucas Pereira de Gouveia

Coorientador: Me. Diego de Vasconcelos Gonçalves Ferreira

**Maceió-AL
2021**

ANTONIO PAULO AMANCIO FERRO

**ANÁLISE ESTATÍSTICA EM DADOS DE PERFILAGEM COMO SUPORTE À
AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DO REVESTIMENTO DE POÇOS DE
PETRÓLEO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

**Maceió-AL
2021**

Folha de Aprovação

AUTOR: ANTONIO PAULO AMANCIO FERRO

Análise Estatística em Dados de Perfilagem como Suporte à Avaliação da Integridade do Revestimento de Poços de Petróleo. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Alagoas.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovada em 03 de Fevereiro de 2021.

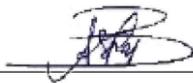


Prof. Dr. Lucas Pereira de Gouveia (Orientador)
Universidade Federal de Alagoas



Me. Diego de Vasconcelos Gonçalves Ferreira (Coorientador)
Universidade Federal de Alagoas

Banca Examinadora:



Prof. Dra. Aline da Silva Ramos Barboza (Examinador Interno)
Universidade Federal de Alagoas



Prof. Dr. Eduardo Toledo de Lima Junior (Examinador Interno)
Universidade Federal de Alagoas

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais, Climério e Betânia, pelo suporte e carinho ao longo de toda trajetória acadêmica e por mostrar que a educação vale à pena. Sem vocês não seria possível completar mais essa etapa.

Agradeço aos orientadores deste trabalho, Me. Lucas Pereira de Gouveia e Me. Diego de Vasconcelos Gonçalves Ferreira pela paciência, conselhos e direcionamentos durante este trabalho e ao longo da iniciação científica.

À Universidade Federal de Alagoas e ao Centro de Tecnologia (CTEC), por ofertar o curso de engenharia civil e possibilitar um espaço agradável de aprendizado e engrandecimento pessoal em todos os sentidos.

Ao Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV) e todos os seus colaboradores pela infraestrutura disponibilizada e contribuições técnicas para a minha formação.

A todos os amigos que fiz ao longo desses cinco anos e que muito ajudaram nos estudos e na rotina do curso. Em especial: Bruno Felipe, Otávio, Gilberto e Luísa.

Aos professores do curso de engenharia civil por todo conhecimento repassado, por mostrar a beleza da engenharia e por servirem de modelo de ótimos profissionais.

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin

“Só podemos alcançar um grande êxito quando nos mantemos fiéis a nós mesmos.”

Friedrich Nietzsche

RESUMO

O revestimento de poços de petróleo consiste em uma estrutura tubular em aço de alta resistência que desempenha funções diversas, seja no decorrer da fase construtiva do poço como também ao longo da sua vida produtiva. Durante a operação de perfuração do poço, o desgaste mecânico causado pelo contato entre a coluna de perfuração e a parede interna do revestimento é um problema que impacta diretamente na integridade estrutural da coluna de revestimento. Esse fenômeno é de difícil previsão e causa redução na resistência dos tubulares, o que em conjunto com as condições extremas do poço, aumenta o risco de falha dessa estrutura. Na tentativa de avaliar as condições de integridade de um poço executado, a indústria de óleo e gás utiliza sensores em uma técnica chamada de perfilagem ultrassônica, e que é aplicada após as operações de perfuração. A perfilagem ultrassônica é capaz de fornecer dados de espessura e raio interno do tubo ao longo da coluna de revestimento, fornecendo os meios para identificar danos estruturais por desgaste. Neste trabalho, desenvolve-se uma análise estatística, em conjunto com métodos numéricos de ajuste aos dados de perfilagem, para que seja possível melhor identificar o desgaste em seções transversais da coluna de revestimento. O método dos mínimos quadrados é aplicado para o ajuste de uma geometria elíptica teórica distorcida e rotacionada aos dados de perfilagem ultrassônica. O ajuste possibilita quantificar o desgaste e capturar as imperfeições geométricas como ovalização e excentricidade presente nos dados. A análise estatística é aplicada nos resíduos do ajuste e consiste em estratégias desenvolvidas para identificação dos parâmetros estatísticos do ruído das medições do instrumento, o que possibilita melhor avaliar as variações de geometria nas seções investigadas e fornecer maior confiabilidade na quantificação do desgaste. Testes de aderência são aplicados em conjunto com os parâmetros estatísticos do ruído, e também comparados, para o estudo e interpretação dos dados de perfilagem. As metodologias propostas são verificadas através de simulação utilizando seções virtuais geradas com desgaste, ruído e geometria conhecida, de modo que, em seguida, as metodologias apresentadas são aplicadas em um estudo de caso com dados reais de perfilagem.

Palavras-Chave: Análise Estatística; Perfilagem Ultrassônica; Desgaste em revestimento; Integridade estrutural.

ABSTRACT

A well casing consists of a tubular structure in high-strength steel responsible for different functions, during well construction phase and also in its lifespan. During drilling operation of a well, casing wear, caused by contact between the drilling column and the inner wall of the casing is a problem that directly impacts tubulars structural integrity. This phenomenon is difficult to predict and causes a reduction in tubulars resistance, which together with the extreme conditions of the well, increases the risk of structure failure. In an attempt to assess structural integrity of executed wells, the oil and gas industry uses sensors in a technique called ultrasonic logging, applied after drilling operations. Ultrasonic logging provides casing thickness and internal radius data along casing column, providing means to identify structural damage by casing wear. In this work, a statistical analysis is applied, in addition to numerical fitting methods, to logging data, in order to improve casing wear identification in casing cross sections. Least square method is applied in order to fit a theoretical distorted and rotated elliptical shape to ultrasonic logging data. The fitting procedure enables quantify casing wear and also captures geometrical imperfections like ovality and eccentricity presents in data. The statistical analysis is applied to residuals from fit and consists of strategies developed to identify the statistical parameters of the noise present in logging devices, which makes it possible to better assess the geometry variations in the investigated sections and provide greater reliability in the quantification of casing wear. Goodness of fit tests are applied, together with the statistical noise parameters, and also compared, for the study and interpretation of logging data. The proposed methodologies are verified through simulation using virtual sections generated with wear, noise and known geometry. The verified data treatment methodology, presented in this work, are also applied to a case study with real logging data.

Key Word: Statistical Analysis; Ultrasonic Logging; Casing Wear, Structural Integrity

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Desgaste na estrutura do revestimento em região de <i>dogleg</i>	2
Figura 02 - Esquema da estrutura de uma coluna de revestimento	7
Figura 03 - Principais esforços nos tubulares de revestimento e as tensões que atuam no tubo	8
Figura 04 - Imperfeições fabris dos tubulares: em (a) Ovalização e em (b) excentricidade	9
Figura 05 - Coluna de perfuração causando desgaste	10
Figura 06 - Detalhe da região crítica de contato da coluna de perfuração	11
Figura 07 - Exemplo de trajetória de poço com <i>dogleg</i>	11
Figura 08 - Alguns exemplos de perfuração direcional.....	12
Figura 09 - Primeiras aplicações da perfilagem em poços	14
Figura 10 - Representação dos elementos da perfilagem a cabo em poços.....	14
Figura 11 - Funcionamento do instrumento de perfilagem ultrassônica	16
Figura 12 - Esquema de funcionamento de um equipamento localizador de luvas	18
Figura 13 - Perfil de localização de luvas de revestimento (CCL).....	19
Figura 14 - Fluxograma simplificado da metodologia de ajuste de elipse	20
Figura 15 - Modelo de elipse com 6 parâmetros	21
Figura 16 - Duas iterações para obtenção da geometria antes do desgaste.....	24
Figura 17 - Macroetapas da metodologia de geração da geometria pré-desgaste	25
Figura 18 - Comparação entre seções com diferentes níveis de ruído	26
Figura 19 - Tubo virtual com ovalização imposta.....	28
Figura 20 - Tubo virtual excentricidade imposta.....	29
Figura 21 - Relações geométricas na canaleta de desgaste	30
Figura 22 - Tubo virtual com canaleta imposta.....	30
Figura 23 - Exemplo de histogramas com diferentes distribuições.....	33
Figura 24 - Exemplos de PDFs e CDFs	36
Figura 25 - Informação em dados brutos de perfilagem e nos resíduos de ajuste.....	42
Figura 26 - Fluxograma para estimativa dos parâmetros do ruído em uma seção	46
Figura 27 - Seção real com quadrante reprovado pelo teste <i>t-Student</i> em destaque.....	47
Figura 28 - Seção real com quadrante aprovado pelo teste <i>t-Student</i> em destaque.....	48
Figura 29 - Desgaste x P valor (teste K-S). Com <i>Tool Joint</i> de raio 1,5625 (Caso 1 - Raio).....	52
Figura 30 - Desgaste x P valor (teste K-S). Com <i>Tool Joint</i> de raio 3,0 (Caso 1 - Raio).....	52
Figura 31 - Desgaste x P valor (teste CVM). Com <i>Tool Joint</i> de raio 1,5625 (Caso 1 - Raio).....	53
Figura 32 - Desgaste x P valor (teste CVM). Com <i>Tool Joint</i> de raio 3,0 (Caso 1 - Raio).....	54
Figura 33 - Desgaste x P valor (teste A-D). Com <i>Tool Joint</i> de raio 1,5625 (Caso 1 - Raio).....	54
Figura 34 - Desgaste x P valor (teste A-D). Com <i>Tool Joint</i> de raio 3,0 (Caso 1 - Raio).....	55
Figura 35 - Comparação entre tubos virtuais. Em (a) gerado com <i>tool joint</i> de raio 1,5625 e em (b) com <i>tool joint</i> de raio 3,0	56
Figura 36 - Desgaste x P valor (teste A-D). Com <i>Tool Joint</i> de raio 1,5625 (Caso 1 - Espessura).....	58
Figura 37 - Desgaste x P valor (teste A-D). Com <i>Tool Joint</i> de raio 3,0 (Caso 1 - Espessura).....	58
Figura 38 - Comparação entre EDF e CDF teórica para diferentes níveis de desgaste.....	59
Figura 39 - Desgaste x P valor (teste A-D). Com <i>Tool Joint</i> de raio 1,5625 (Caso 2 - Raio).....	60
Figura 40 - Desgaste x P valor (teste A-D). Com <i>Tool Joint</i> de raio 3,0 (Caso 2 - Raio).....	61
Figura 41 - Desgaste x P valor (teste A-D). Com <i>Tool Joint</i> de raio 1,5625 (Caso 2 - Espessura).....	62

Figura 42 – Desgaste x P valor (teste A-D). Com <i>Tool Joint</i> de raio 3,0 (Caso 2 - Espessura)	62
Figura 43 - Desgaste x P valor (teste A-D). Com <i>Tool Joint</i> de raio 1,5625 (Caso 3 - Raio)	63
Figura 44 - Desgaste x P valor obtido no teste A-D com <i>Tool Joint</i> de raio 3,0 (Caso 3 - Raio)	64
Figura 45 - Desgaste x P valor (teste A-D). Com <i>Tool Joint</i> de raio 1,5625 (Caso 3 - Espessura)	65
Figura 46 - Desgaste x P valor (teste A-D). Com <i>Tool Joint</i> de raio 3,0 (Caso 3 - Espessura)	65
Figura 47 – Comparação entre métodos de identificação de <i>outliers</i> . P-Valor igual a 0,8331	67
Figura 48 - Comparação entre métodos de identificação de outliers. P-Valor igual a 0,1678	67
Figura 49 - Comparativo entre a quantidade de outliers nas seções virtuais	68
Figura 50 - Variação do desvio padrão do ruído ao longo do poço	72
Figura 51 - Comparação entre a quantidade de quadrante aprovados no teste <i>t-Student</i>	73
Figura 52 - Comparação entre a quantidade de amostras do ruído aprovado no teste A-D	74
Figura 53 - Comparação P-valor ao longo do poço	75
Figura 54 - Classificação do conjunto de dados de resíduos do poço (dados de raio interno)	76
Figura 55 - Maior P-valor no conjunto de seções aprovadas sem <i>outliers</i> (Raio)	78
Figura 56 - Menor P-valor no conjunto de seções aprovadas sem <i>outliers</i> (Raio)	78
Figura 57 - Maior P-valor no conjunto de seções aprovadas com <i>outliers</i> (Raio)	79
Figura 58 - Menor P-valor no conjunto de seções aprovadas com <i>outliers</i> (Raio)	80
Figura 59 - Maior P-valor no conjunto de seções reprovadas (Raio)	81
Figura 60 - Menor P-valor no conjunto de seções reprovadas (Raio)	81
Figura 61 - Classificação das amostras de resíduos do poço (dados de espessura)	82
Figura 62 - Seção com problemas de ajuste (dado de espessura)	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de seções virtuais geradas.....	43
Tabela 2 - Geometria das seções geradas.....	44
Tabela 3 - Parâmetros do ruído imposto	44
Tabela 4 - Imperfeição geométrica imposta.....	44
Tabela 5 - Parâmetros do ruído estimado para as seções virtuais	50
Tabela 6 - Comparação entre os testes de aderência. Caso 1 – Raio	56
Tabela 7 - Comparação entre os testes de aderência. Caso 1 – Espessura.....	57
Tabela 8 - Comparação entre os testes de aderência. Caso 2 – Raio	61
Tabela 9 - Comparação entre os testes de aderência. Caso 2 – Espessura.....	63
Tabela 10 - Comparação entre os testes de aderência. Caso 3 – Raio	64
Tabela 11 - Comparação entre os testes de aderência. Caso 3 – Espessura	66
Tabela 12 – Parâmetros geométricos nominais dos tubulares	70
Tabela 13 - Parâmetros relacionados a perfilagem	70
Tabela 14 - Parâmetros do ruído estimado para todo o poço.....	70
Tabela 15 - Parâmetros do ruído em vários intervalos do poço analisado.....	71
Tabela 16 - Quantidade de quadrantes aprovados no teste <i>t-Student</i>	73
Tabela 17 - Porcentagem de aprovação no teste A-D usando os quadrantes aprovados pelo <i>t-Student</i>	74
Tabela 18 - Quantidade de seções para cada classificação baseada no P-Valor (Raio).....	77
Tabela 19 - Quantidade de seções para cada classificação baseada no P-valor (Espessura) ...	83

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICATIVA	3
1.2	OBJETIVOS	4
1.2.1	Objetivo geral	4
1.2.2	Objetivos específicos	4
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2	REFERENCIAL TEÓRICO	6
2.1	CONSIDERAÇÕES BÁSICAS SOBRE O PROJETO DE REVESTIMENTO	6
2.2	DESGASTE EM REVESTIMENTO	10
2.3	PERFILAGEM DE POÇOS	12
2.3.1	Contexto da perfilagem na indústria de petróleo	12
2.3.2	Perfilagem aplicada a integridade do revestimento	15
2.3.3	Instrumento auxiliar ao processo de perfilagem	18
2.4	QUANTIFICAÇÃO DE DESGASTE	20
2.4.1	Método de quantificação da literatura	20
2.4.2	Metodologia geométrica aprimorada	23
2.4.3	Geometria pré-desgaste e o ruído do equipamento	24
2.5	MÉTODO PARA VERIFICAÇÃO DE RESULTADOS: SEÇÕES VIRTUAIS	26
2.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DADOS	31
2.6.1	Ferramentas da Estatística Descritiva	32
2.6.2	Reconhecimento de valores discrepantes: Outliers	33
2.6.3	Distribuições na estatística	34
2.6.4	Inferência Estatística: Testes de hipótese	36
2.6.5	Teste paramétrico t-Student	37
2.6.6	Teste não paramétrico: Kolmogorov-Smirnov (K-S)	38
2.6.7	Teste não paramétrico: Cramér-von Mises (CVM)	39
2.6.8	Teste não paramétrico: Anderson-Darling (A-D)	39
3	METODOLOGIA	41
3.1	GERAÇÃO DE SEÇÕES VIRTUAIS	43
3.2	ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DO RUÍDO	45
3.3	TESTES DE ADERÊNCIA	48
3.4	RECURSOS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS NO TRABALHO	49
4	RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO COM SEÇÕES VIRTUAIS	50
4.1	SEÇÕES VIRTUAIS: CASO 1	51
4.1.1	Caso 1 – Raio interno	51
4.1.2	Caso 1 – Espessura	57
4.2	SEÇÕES VIRTUAIS: CASO 2	59
4.2.1	Caso 2 - Raio interno	60
4.2.2	Caso 2 - Espessura	61
4.3	SEÇÕES VIRTUAIS: CASO 3	63
4.3.1	Caso 3 - Raio interno	63
4.3.2	Caso 3 - Espessura	64
4.4	IDENTIFICAÇÃO DE OUTLIERS	66
4.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE DAS SEÇÕES VIRTUAIS	68
5	ESTUDO DE CASO	70
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

1 INTRODUÇÃO

A estrutura que compõe os revestimentos de poços de petróleo evoluiu com o tempo para se adequar às necessidades da exploração de recursos, seja em ambiente terrestre ou sob condições extremas na exploração *offshore*. Como exposto por Thomas (2001), a estrutura do revestimento passou das alvenarias rudimentares usadas na antiguidade para poços artesianos, passando por estruturas de madeira e por tubos de ferro fundido até culminar na estrutura tubular de aço especial para poços de petróleo.

A moderna estrutura de revestimento do poço de petróleo consiste em um conjunto de tubulares de alta resistência com diâmetro variável encaixados ao longo do poço, formando uma estrutura telescópica que permite a drenagem do óleo dos reservatórios rochosos até a superfície. A chamada coluna de revestimento tem a função não apenas de manter a estabilidade das paredes laterais do poço na perfuração, como também permitir o retorno de fluido de perfuração e manter a estanqueidade do poço (THOMAS, 2001; BERNT, 2010).

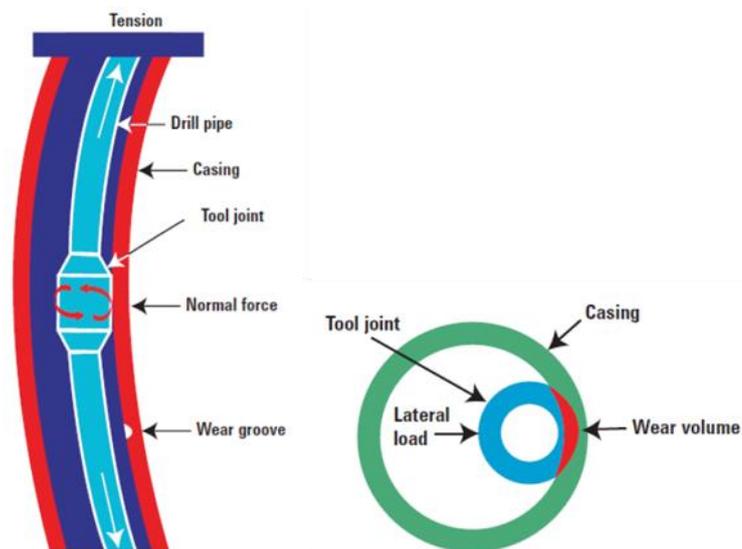
O projeto estrutural dos revestimentos consiste, como mencionado por Rocha e Azevedo (2009), na especificação de parâmetros como espessura e grau do aço para que seja possível resistir a esforços como colapso, pressão interna e tração. Além disso, devido ao alto custo da estrutura, o dimensionamento deve considerar a otimização dimensional como critério, tornando a preservação da integridade da estrutura em serviço um desafio (BOURGOYNE, 1991).

A preocupação acerca da integridade dos tubulares surge das solicitações adversas durante a vida produtiva do poço, bem como durante a própria operação de perfuração, que pode comprometer a estrutura e levá-la ao colapso. Danos significativos podem surgir provocando falhas catastróficas, levando, no pior cenário, ao abandono do poço (MITCHELL e XIANG, 2012).

O estudo dos danos em um poço executado é importante para a análise de possíveis falhas durante a vida produtiva e como suporte às decisões operacionais, mas também contribui na melhoria de coeficientes de segurança e modelos de cálculo no dimensionamento de poços futuros. Análises mais confiáveis utilizando os dados do poço contribuem para um entendimento do comportamento mecânico da estrutura e, frequentemente, ajudam no desenvolvimento de modelos para previsão desses danos (SHEN, 2012; MITCHELL e XIANG, 2012; KUMAR e SAMUEL, 2015).

As condições complexas a serem vencidas durante as operações de perfuração sob grande profundidade em poços *offshore*, têm direcionado a indústria a desenvolver e aprimorar métodos de quantificação de desgaste para avaliar a integridade estrutural do revestimento. Como exposto por Kumar (2015), nas últimas décadas a demanda para o desenvolvimento de poços mais complexos aumentou, o que constitui uma maior preocupação em relação ao programa de controle do revestimento. Um dos motivos para uma maior preocupação decorre da gravidade do fenômeno do desgaste que é acentuado com os ganhos de ângulos conhecidos como *dogleg* ao longo de uma trajetória mais complexa. O desgaste mecânico no revestimento é causado pelo contato da coluna de perfuração com a parede interna onde, em situações extremas, a remoção de material é responsável por uma redução crítica da resistência da estrutura resultando no colapso do poço (KURIYAMA, et al., 1992). Na Figura 01 é apresentado o mecanismo de desgaste em revestimentos.

Figura 01 - Desgaste na estrutura do revestimento em região de *dogleg*



Fonte: SEITINGER (2010).

Segundo Bourgoyne (1991) a parcela de custo do revestimento é alta, e com isso é necessário dimensionar a estrutura de maneira otimizada a fim de que seja possível suportar as condições de serviço e operar com segurança durante a vida útil do poço. Como mencionado por Thomas (2001), o custo do revestimento em poços *offshore* é estimado entre 15% a 20% do custo total de execução do poço. Dessa forma, é necessário avaliar com maior precisão a taxa de desgaste para que, como exposto por Mitchell e Xiang (2012), seja possível acessar a máxima taxa permissível de desgaste para manter a integridade da estrutura, a fim de que se

elimine a necessidade de adotar fatores de segurança excessivos que impactam no custo do projeto como um todo.

Os equipamentos de perfilagem são usados para medir diversas propriedades do poço, tais como características das formações rochosas em poço aberto e condições de integridade de poço revestido. De forma mais específica, os equipamentos de perfilagem ultrassônica podem ser utilizados para capturar as variações dimensionais dos tubulares na tentativa de quantificar a perda de material e identificar as regiões críticas. Dessa forma, esses equipamentos são utilizados pela indústria principalmente após as etapas de perfuração, com o objetivo de caracterizar os danos causados. Estes equipamentos são capazes de aferir, dentre outros parâmetros, as medidas de raio interno e de espessura do revestimento ao longo do poço. Essas são as medidas que possibilitam identificar e quantificar os danos presentes na estrutura do revestimento quando aplicadas metodologias apropriadas.

Em Chandrasekhar et al. (2019), é discutido um método numérico aplicado aos dados de raio interno e espessura, obtidos da perfilagem ultrassônica, e que é utilizado justamente para quantificação da perda de material por desgaste mecânico no revestimento. A estratégia consiste na obtenção da geometria antes do desgaste através de ajustes numéricos através do método dos mínimos quadrados. Essa técnica permite também acessar os níveis de imperfeição geométrica de ovalização e excentricidade presente nas seções transversais investigadas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os dados de perfilagem ultrassônica possuem muitas informações agregadas. Espera-se que as variações dimensionais registradas correspondam à influência conjunta da ovalização, excentricidade, ruído do equipamento e desgaste. Dessa forma, apenas analisar os dados brutos e extrair deles informações significativas não é possível, é necessário aplicar métodos numéricos e análises estatísticas para aumentar a confiabilidade nos resultados. Dessa forma, métodos de ajuste numérico com geometrias elípticas, adaptados da literatura, são úteis para quantificar o desgaste e capturar as imperfeições geométricas (ovalização e excentricidade), como é comentado neste trabalho. Enquanto isso, os resultados da aplicação da análise estatística, que é o ponto principal de discussão desse trabalho, complementam a análise feita com os métodos numéricos ao auxiliar na identificação de seções espúrias e desgastadas, dissociar variações geométricas devido ao desgaste daquelas causadas pelo ruído do equipamento, e ao estabelecer melhor a precisão dos resultados da quantificação de desgaste

utilizando as metodologias de ajuste. Além disso, os estudos desenvolvidos nesse trabalho também são justificados ainda pelo fornecimento de dados de geometria da seção transversal que sejam representativos das seções medidas em campo, para que seja possível melhorar os métodos de quantificação de desgaste.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Contribuir no estudo de metodologias para aprimorar os métodos de identificação e quantificação de desgaste mecânico em revestimento de poços de petróleo utilizando dados de perfilagem.

1.2.2 Objetivos específicos

- Fazer estudo de caso com dados de perfilagem de um poço executado e aplicar a metodologia desenvolvida na análise das características desse poço.
- Estimar os parâmetros estatísticos do ruído de medição para caracterizar sua distribuição estatística. Além de interpretar informações relacionadas aos dados de perfilagem ultrassônica frente às informações encontradas na literatura;
- Explorar a metodologia estatística para identificação do desgaste através dos dados de perfilagem e da caracterização da distribuição do ruído de medição;
- Comparar testes estatísticos de aderência para determinar o mais apropriado para o problema proposto;

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Nesta seção, é apresentada de forma sucinta a distribuição do conteúdo exposto neste trabalho.

No capítulo 2 é apresentado a revisão bibliográfica com tópicos principais relacionados ao problema tratado neste trabalho. É apresentado o embasamento necessário para a compreensão da metodologia e discussão dos resultados. Neste caso, são abordados os conceitos básicos acerca dos projetos de revestimento, o entendimento sobre os fenômenos do desgaste mecânico, o processo de aquisição de dados através dos equipamentos de perfilagem, além da revisão dos métodos de quantificação de desgaste por ajuste numérico. Apresentam-se, em seguida as técnicas que são utilizadas para geração de seções virtuais similares aos dados de perfilagem, para a verificação dos resultados dos métodos de quantificação discutidos. Por

fim, nessa seção é apresentado também o referencial teórico acerca dos métodos, utilizados nesse trabalho, para análise estatística nos dados de perfilagem ultrassônica.

No capítulo 3 é abordada a metodologia utilizada no trabalho, sendo discutido a proposta para estimar o ruído do equipamento de perfilagem e, também, as considerações para a criação dos conjuntos de dados, com um algoritmo de geração de seções virtuais, a serem testados inicialmente para a verificação da metodologia analisada nesse trabalho. Os principais parâmetros relacionados a cada um dos casos são apresentados. Também são apresentados brevemente os recursos computacionais que são utilizados nesse trabalho.

No capítulo 4, são apresentados os resultados com as seções virtuais, mostrando a comparação da metodologia de estimativa de ruído com os valores conhecidos presentes nas seções. É apresentada também a comparação com os testes de aderência aplicados em seções nas quais os dados possuem níveis de desgaste, ruído, ovalização e excentricidade conhecidos.

No capítulo 5, o estudo de caso é apresentado. Utiliza-se a metodologia para estimar o ruído e as considerações feitas no capítulo 4 para discutir as características identificadas com as seções obtidas da perfilagem (raio interno e espessura) de um poço real.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

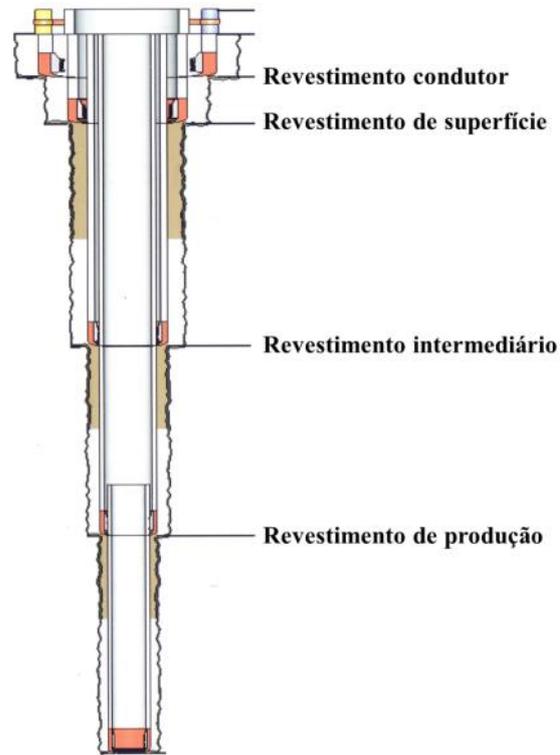
2.1 CONSIDERAÇÕES BÁSICAS SOBRE O PROJETO DE REVESTIMENTO

As chamadas colunas de revestimento são constituídas por segmentos de tubo conectados uns aos outros formando as fases do revestimento. Como mencionado em Koehler (2018), a fase é um conjunto de segmentos com o mesmo diâmetro e cada projeto define a quantidade de fases necessárias. Usualmente, a coluna de revestimento é dividida de acordo com suas características e funções, sendo as principais apresentadas abaixo:

- 1) Revestimento condutor: Segundo Thomas (2001), este segmento da coluna de revestimento é assentado em pequenas profundidades que ficam em torno de 10 a 50 m e atua na estabilidade das camadas com sedimentos não consolidados e serve como sustentação das colunas seguintes e como base para o poço. (ABREU, 2019; SILVA, 2018).
- 2) Revestimento de Superfície: Serve como base de apoio para os equipamentos de superfície e por isso oferece resistência à flambagem e protege lençóis freáticos de agentes contaminantes presentes na lama de perfuração, bem como protege a formação de danos causados pela circulação do fluido de perfuração (SILVA, 2018).
- 3) Revestimento Intermediário: Possui maior resistência mecânica e atua isolando as seções instáveis do poço suportando condições de pressão altas. A faixa de profundidade de assentamento é vasta, variando entre 1000m a 4000m (THOMAS, 2001).
- 4) Revestimento de Produção: é a fase final da coluna de revestimento e utilizado para isolar as zonas produtoras de hidrocarbonetos (ABREU, 2019).

A Figura 02 a seguir ilustra a estrutura telescópica com indicação das fases mencionadas acima:

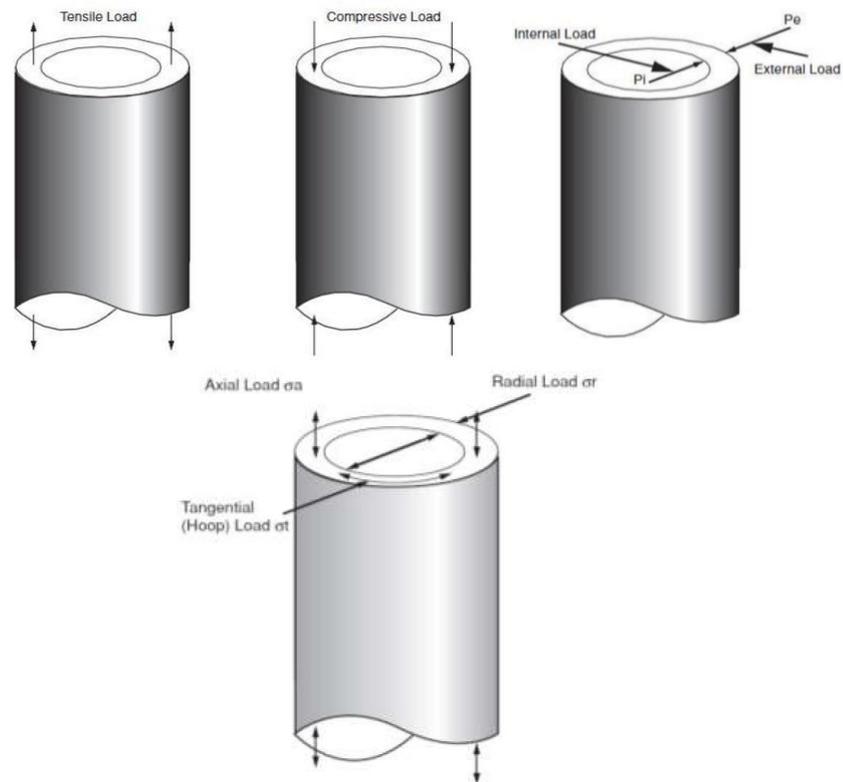
Figura 02 - Esquema da estrutura de uma coluna de revestimento



Fonte: AZEVEDO e ROCHA (2009).

Como mencionado por Azar e Samuel (2007) o revestimento deve ser dimensionado para suportar qualquer carregamento devido aos fluidos da formação, ao fluido de perfuração durante qualquer fase de perfuração ou produção além, é claro, outros carregamentos envolvidos durante toda a etapa de assentamento e ao longo de sua vida produtiva. Os esforços comuns que a estrutura deve resistir são pressões internas durante a perfuração ou produção, pressão externa causadas principalmente por zonas de alta pressão e carregamentos mecânicos e, por fim, esforços axiais, que na maioria dos casos são devidos ao peso próprio da coluna de revestimento. Portanto, as tensões que atuam combinadas, devido a todos os esforços mencionados, em um tubo de revestimento e que são consideradas no dimensionamento dessa estrutura são: a tensão axial que atua na direção do comprimento do tubo, a tensão radial que é gerada pelos esforços atuantes na direção radial e a tensão tangencial que atua ao longo da circunferência do tubular. A Figura 03 ilustra as tensões mencionadas.

Figura 03 - Principais esforços nos tubulares de revestimento e as tensões que atuam no tubo

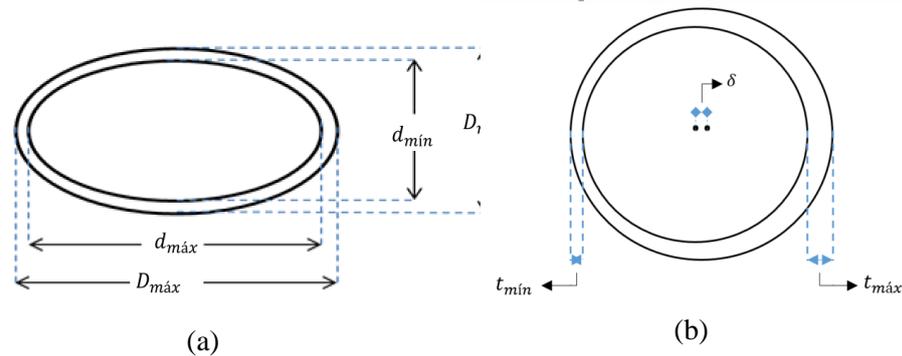


Fonte: ASLANIDIS (2018).

À medida que surge a necessidade cada vez maior de alcançar reservatórios mais profundos, e em condições operacionais mais severas, a preocupação acerca da falha estrutural dos tubos de revestimento aumenta, devido a maiores pressões e temperaturas nessas situações. É de interesse, portanto, estudar os mecanismos de falha dessa estrutura em serviço, que são principalmente a explosão (*burst*) e o colapso (*collapse*), causados por diferenciais de pressão no tubo. Quando a resistência à pressão interna é ultrapassada tem-se o *burst* e quando a resistência à pressão externa é ultrapassada tem-se o *collapse* (SILVA, 2020; GOUVEIA, 2014).

Uma condição que tem que ser analisada é que os tubos de revestimento fabricados não são tubos perfeitos. O processo de manufatura tende a gerar imperfeições, como excentricidade e ovalização. Como mencionado em Andrade (2017), a ovalização corresponde a não preservação da forma circular do tubo e a excentricidade corresponde a não uniformização dos valores de espessura de parede em uma mesma geratriz da seção. A Figura 04 abaixo ilustra, de forma exagerada, os dois problemas de fabricação encontrados nos tubulares.

Figura 04 - Imperfeições fabris dos tubulares: em (a) Ovalização e em (b) excentricidade



Fonte: ANDRADE (2017).

As imperfeições mencionadas afetam a resistência estrutural do revestimento. Como consta em Silva (2020), o efeito separado de ovalização e excentricidade reduz a resistência ao colapso, onde a ovalização possui uma influência maior para este caso do que a excentricidade. Porém ambas imperfeições ocorrem combinadas nos revestimentos assentados e isso deve ser considerado em uma análise estrutural.

A norma API/TR 5C3 (2008) apresenta os dados estatísticos de excentricidade e ovalização dos tubos fabricados bem como de outras variáveis estatísticas importantes. Dessa forma, tem-se uma noção da gravidade dessas imperfeições nos tubos comercializados. Porém, sabe-se que nos poços executados, essas imperfeições combinadas podem se agravar devido ao estado de tensões do tubo, além disso, no próprio processo de manipulação em campo, durante a descida e assentamento do revestimento, a ovalização pode aumentar (KORNBERG, 2017). A Equação (1) e Equação (2) apresentam as expressões apresentadas na norma API/TR 5C3 para o cálculo da ovalização e da excentricidade, respectivamente.

$$ov = \frac{OD_{max} - OD_{min}}{OD_{ave}} 100\% \quad (1)$$

$$ecc = \frac{wt_{max} - wt_{min}}{wt_{ave}} 100\% \quad (2)$$

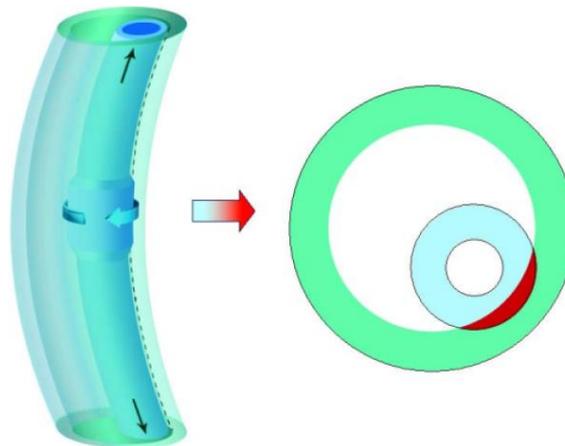
A medida de diâmetro externo médio (OD_{ave}) apresentada na Equação (1) é obtida pela média entre o máximo (OD_{max}) e o mínimo (OD_{min}). De forma análoga calcula-se a espessura média (wt_{ave}).

Além da influência das imperfeições na resistência dos tubos de revestimento, a combinação da ovalização com excentricidade e danos, como o desgaste, geram concentrações de tensões que podem reduzir significativamente a resistência do tubo.

2.2 DESGASTE EM REVESTIMENTO

O desgaste em revestimento é, nas palavras de Kumar e Samuel (2015), um desafio contínuo enfrentado pela indústria petrolífera. Este problema surge durante a operação de perfuração do poço e consiste no contato entre a coluna de perfuração com a parede interna do revestimento (BRADLEY e FONTENOT, 1975; HALL et al., 1994). A Figura 05 ilustra o fenômeno de remoção de material da parede do tubo durante a perfuração.

Figura 05 - Coluna de perfuração causando desgaste



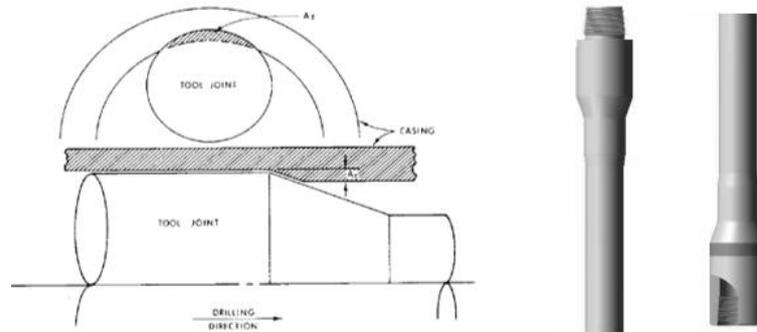
Fonte: MITCHELL e XIANG (2012).

A literatura especializada em engenharia de perfuração de poços tem abordado cada vez mais o problema do desgaste em revestimentos. A redução da parede do tubo impacta diretamente na resistência da estrutura para suportar as pressões e solicitações axiais em efeito combinado, o que motiva estudos aprofundados do impacto deste fenômeno e de suas causas.

A coluna de perfuração é a estrutura responsável por fornecer a energia de rotação da broca para que seja possível cortar diversas formações rochosas. A própria coluna é segmentada e constituída de vários componentes. As chamadas *tool joints*, são regiões particularmente importantes da coluna de perfuração para o estudo do desgaste nos tubulares, pois é a região de contato preferencial com a parede interna do revestimento. Essa região consiste no sistema de conexão entre segmentos da coluna de perfuração e apresenta diâmetro mais elevado que as

demais regiões da coluna. A Figura 06 ilustra mais detalhadamente a região de *tool joint* com a região crítica de contato com a parede interna do revestimento.

Figura 06 - Detalhe da região crítica de contato da coluna de perfuração

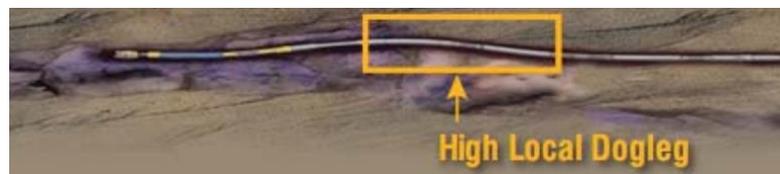


Fonte: BRADLEY e FONTENOT (1975) e THOMAS (2001).

Os principais fatores que afetam a intensidade do desgaste causado pelo contato da *tool joint* geralmente incluem parâmetros operacionais de perfuração (como a rotação da coluna), propriedades dos fluidos de perfuração, condições da superfície da *tool joint* e principalmente a trajetória do poço.

Tendo em vista que nas últimas décadas a demanda para a execução de poços mais complexos aumentou, elevou-se, de forma direta, a preocupação em relação ao programa de controle do revestimento. Um dos motivos para uma maior preocupação, decorre da gravidade do fenômeno do desgaste que é acentuado com os ganhos de ângulos conhecidos como *dogleg* ao longo de uma trajetória mais complexa. A Figura 07 ilustra um caso local de *dogleg*.

Figura 07 - Exemplo de trajetória de poço com *dogleg*

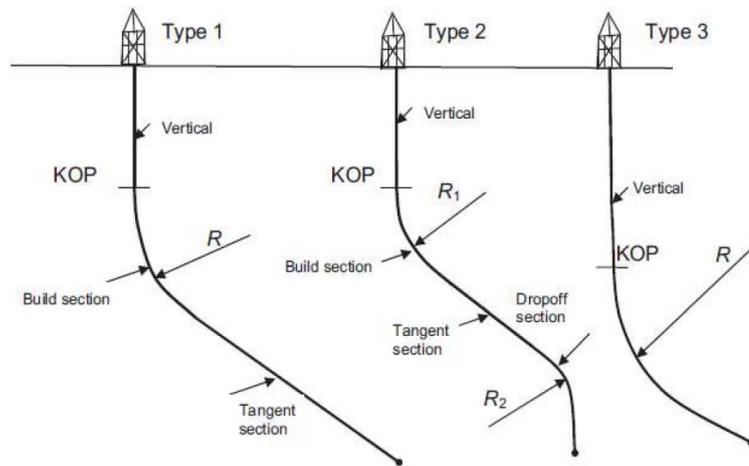


Fonte: SEITINGER (2010).

A Figura 08 traz ainda alguns exemplos de tipos de perfuração em poços direcionais, ou seja, poços com geometria não vertical. Os poços direcionais são comuns em situações de perfuração *offshore* e, tendo em vista que problemas como a tortuosidade (excesso de curvatura) possam surgir, eleva-se os cuidados necessários em relação ao monitoramento da severidade do desgaste. Como mencionado na literatura, o desgaste causado pelo contato da *tool joint* com a

parede do revestimento tem forte ligação com a trajetória do poço. Como mencionado por Hall et al. (1994), o desgaste é aproximadamente proporcional ao *dogleg*.

Figura 08 - Alguns exemplos de perfuração direcional



Fonte: ASLANIDIS (2018).

Dessa forma, um programa de monitoramento é necessário durante o processo de perfuração. A análise *As-Built* do poço fornece parâmetros para atestar se o desgaste máximo permitido não foi atingido e também induz, caso comprove algum dano significativo na estrutura, o acionamento de medidas para mitigar esses efeitos. A indústria tem que quantificar o desgaste utilizando os dados de variação dimensional no revestimento ao longo do poço para identificar problemas.

2.3 PERFILAGEM DE POÇOS

2.3.1 Contexto da perfilagem na indústria de petróleo

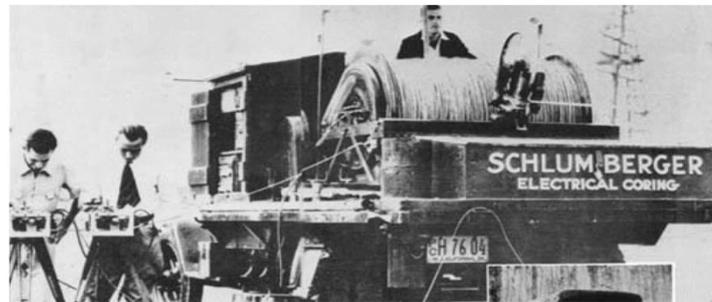
O termo perfilagem possui sentido amplo, consistindo de forma geral em operações de caráter investigativo que são realizadas através de sensores com ferramentas diversificadas para medição e coleta de informações, oferecendo dados importantes para a análise do poço perfurado. A perfilagem possui significado diferente para diversos profissionais em suas áreas de atuação na indústria do petróleo. Segundo Ellis e Singer (2008), para um geólogo a perfilagem consiste em fonte complementar aos dados obtidos em superfície sobre as formações geológicas subsuperficiais, para um engenheiro de reservatório pode significar simplesmente dados importantes que serão usados em futuras simulações, sendo que para um petrofísico a

prática da perfilagem pode significar tão somente a avaliação do potencial de produção do reservatório.

Historicamente a perfilagem tem sua origem ligada as investigações feitas ao longo da década de 1920 pelos irmãos Conrad Schlumberger (1878-1936) e Emile Henry Marcel Schlumberger (1884-1953), cujo estudo levou a utilização de sondas para medição da resistividade diretamente em um poço na região da Alsácia, no leste da França, em meados de 1927. Mais precisamente, no dia 5 de setembro de 1927, na cidade francesa de *Pechelbronn*, ocorreu a primeira tentativa, com uma equipe liderada pelo físico experimental Henri Doll (1902-1991), de utilizar uma sonda para captar informações de várias profundidades discretas ao longo do poço. Esse novo processo trouxe inovações positivas uma vez que se tornou possível captar dados confiáveis das formações rochosas de forma prática, sem depender da análise da composição dos resíduos ou amostras retiradas do poço perfurado e que frequentemente forneciam resultados não confiáveis, além de resultar em um processo mais demorado e sem correlação direta com valores discretos de profundidade ao longo do poço (SCHLUMBERGER, 2020; ELLIS E SINGER, 2008; O.SERRA, 1984).

O primeiro equipamento consistia em uma sonda rudimentar formada por um corpo cilíndrico de baquelite e com a adição de eletrodos metálicos conectados externamente ao cilindro, que por sua vez era conectado a superfície por um cabo de onde era feita a transmissão de informações. O parâmetro medido era de resistividade para determinação da porosidade das rochas atravessadas pelo poço perfurado. A necessidade cada vez maior de aprimoramento e de obtenção de informações geológicas resultou em avanços significativos ao longo do século XX, de forma que a perfilagem é hoje capaz de oferecer parâmetros importantes utilizados em análises acerca da produção do reservatório e tomadas de decisões que acompanham o processo de perfuração (SCHLUMBERGER, 2020). A Figura 09 apresenta equipamentos utilizado durante as primeiras perfilagem em poços.

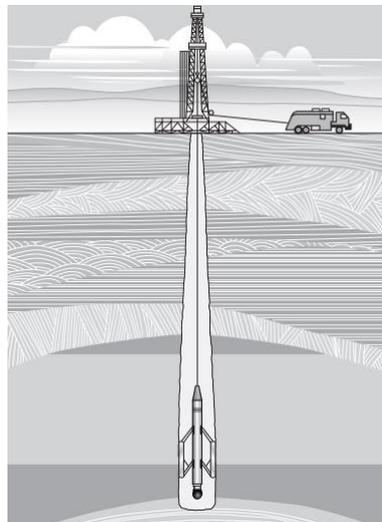
Figura 09 - Primeiras aplicações da perfilagem em poços



Fonte: CHOPRA et al. (2002)

Na Figura 10, é apresentada uma ilustração dos elementos que constituem o processo de perfilagem tradicional. O termo perfilagem a cabo (*wireline logging*) acabou se popularizando com os primeiros equipamentos empregados, onde a ferramenta era decida e retirada do poço através de um cabo blindado contendo em seu interior cabos elétricos isolados, fornecendo a energia ao dispositivo, além dos cabos adicionais que fornecem meios para a transmissão de dados para a superfície. Os dados eram processados na superfície e correlacionados com a profundidade, gerando com isso o chamado perfil do poço.

Figura 10 - Representação dos elementos da perfilagem a cabo em poços



Fonte: ELLIS e SINGER (2008)

Nos anos que se seguiram imediatamente a publicação dos resultados dos irmãos Schlumberger e do físico Henri Doll na forma de artigo científico em 1929 poucas alterações foram feitas na maneira de executar a perfilagem. Foi somente a partir do grande desenvolvimento de áreas da ciência como a física e a química aliado ao desenvolvimento tecnológico no contexto dos circuitos integrados nas décadas de 1950 e 1960 que o método

experimentou maiores mudanças. Vários equipamentos cada vez mais arrojados foram surgindo e possuindo a capacidade de medir vários parâmetros de interesse, culminando nas versões modernas empregadas em poços *onshore* e *offshore* atualmente. Como é apresentado em O.Serra (1984), as ferramentas variam em complexidade, onde há equipamentos sofisticados composto de circuitos eletrônicos complexos agrupados em compartimentos metálicos resistentes a pressões e temperaturas elevadas, assim como também há ferramentas mais simples sendo empregadas.

Na perfilagem moderna, existem equipamentos que detectam a radioatividade da formação geológica para identificar a litologia e minerais radioativos, assim como outros que medem o tempo de trânsito de ondas mecânicas para inferir grau de porosidade das rochas e detecção de fraturas, além de vários outros que oferecem perfis do poço para aplicações diversas na avaliação de formações geológicas. Porém, com a versatilidade desses equipamentos logo foi ampliado a sua utilização, de modo que atualmente os aparelhos de perfilagem são empregados em várias fases de execução do poço servindo para extrair informações seguras nas etapas de produção, podendo identificar densidade da mistura de fluidos assim como a sua temperatura, além de ser útil para avaliar a qualidade de certas operações durante o processo de perfuração, como a cimentação de cada fase do revestimento, assim como avaliar danos e imperfeições em sua estrutura.

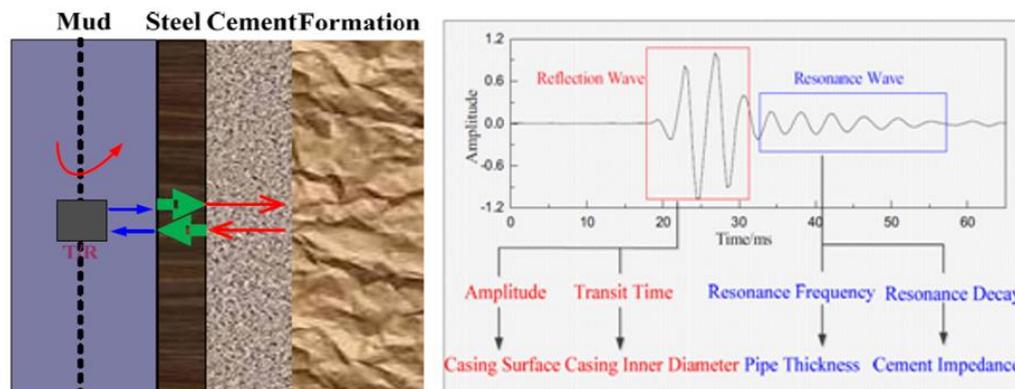
Dessa forma, o processo de perfilagem tornou-se abrangente ao longo dos anos. Como apresentado em Thomas (2001) e também em Chowdhury (2019), o processo de perfilagem, quanto a sua atuação, pode ser dividida em perfilagem geofísica e geológica, geralmente executada ainda em poço aberto e com o objetivo de obter informações das formações geológicas atravessadas; e também a perfilagem aplicada durante a completação do poço, que compreende as etapas para tornar o poço apto para a produção e que neste caso envolve os processos de avaliação de integridade do revestimento e qualidade da cimentação do poço e diversas investigações relacionada a verificação da segurança para execução dos futuros processos.

2.3.2 Perfilagem aplicada a integridade do revestimento

Os dados utilizados neste trabalho correspondem as medidas da geometria dos tubulares em fases da coluna de revestimento, obtidas com os aparelhos ultrassônicos de perfilagem. Esses equipamentos são comumente utilizados para avaliação da integridade do revestimento. Apesar de diferenças existentes, os princípios básicos permanecem.

O funcionamento desses instrumentos é baseado na técnica de medição por reflexão e ressonância do pulso ultrassônico emitido pela excitação do transdutor piezoelétrico (SUN et al, 2013). A configuração mais comum desse equipamento envolve o acoplamento de unidades de processamento, motor e centralizadores. Na cabeça da ferramenta, uma sonda rotativa acopla um ou mais transdutores. A Figura 11 representa os fenômenos envolvidos na aquisição de dados com o método de perfilagem ultrassônica.

Figura 11 - Funcionamento do instrumento de perfilagem ultrassônica



Fonte: SUN et. al (2013)

As medidas geométricas dos tubulares são obtidas com algoritmos de processamento no equipamento, de onde é possível, com a reflexão dos pulsos ultrassônicos, obter medidas de raio interno, e com fenômeno da ressonância na parede do revestimento, obter as medidas de espessura como mostrado na Figura 11. Como exposto em Ripman (2011), as frequências emitidas são na faixa de 200 até 700 kHz e a rotação do equipamento é de cerca de 7.5 rps.

A unidade de processamento é responsável por interpretar e extrair as informações através da emissão e recebimento das ondas ultrassônicas emitidas. O motor é responsável por permitir a rotação da sonda e conseqüentemente permitir a cobertura radial do revestimento. Os centralizadores são essenciais para evitar problemas de acurácia na mediação dos parâmetros devido a excentricidade do equipamento dentro do tubular, problema particularmente crítico em regiões de alto *dogleg*.

Os modernos equipamentos são amplamente utilizados pois possibilitam recuperar tanto dados relacionados a integridade do revestimento, como também da qualidade da cimentação. Os dados que podem ser obtidos por esses instrumentos geralmente são: impedância do cimento, raio interno e espessura do revestimento (Ripman, 2011). Além disso, a utilização desses equipamentos apresentou significativa vantagem quando comparado com os

instrumentos chamados de *callipers*, seja em versão puramente mecânica ou na versão eletrônica. Foi possível um aumento na cobertura investigada no revestimento como também a possibilidade de detectar informações para além da parede interna do tubo. A cobertura dos equipamentos de perfilagem geralmente atingem taxas de amostragem radial ajustável entre 4 e 10 graus constituindo uma nuvem de 90 a 36 pontos em uma seção transversal e, como exposto por Seitinger (2010), a amostragem vertical depende do fabricante do equipamento sendo geralmente entre 0,6 e 6 polegadas.

O equipamento permite uma medição precisa nas condições *in situ* dos poços investigados pois é construído para calibração constante com as condições do poço, principalmente relacionadas a velocidade de propagação das ondas nos fluidos de perfuração dentro no tubular. No caso, como presente em Seitinger (2010) e Vigen et al. (2020), esses equipamentos podem ser construídos com o modo de medição das propriedades do fluido (FPM), onde o equipamento considera a velocidade de transmissão das ondas dentro do fluido que permeia o tubular. Isso é possível com testes, que o equipamento é programado para fazer, utilizando placas com uma distância conhecida. No entanto, como todo equipamento de medição, as medidas ainda possuem ruído aleatório presente o que causa variação nos dados obtidos. Neste contexto, o FPM atua apenas evitando que a precisão intrínseca do equipamento seja afetada pelas condições extremas dentro do poço. O ruído presente no equipamento, como apresentado em Chandrasekhar et al. (2019), pode causar problemas na determinação da taxa de desgaste.

Ainda segundo Seitinger (2010), as principais fontes de maiores incertezas envolvidas nesses equipamentos geralmente estão relacionadas a amostragem radial baixa, problemas de centralização que podem estar relacionados a trajetória do tubular e também a perturbações do equipamento quando centralizadores passam por regiões de conexão ou canaletas de desgaste, o que pode provocar maiores perturbações resultando em seções problemáticas, sendo devido não a danos, mas a problemas de aquisição.

No trabalho de Seitinger (2010), são discutidas algumas incertezas de medição que instrumentos de perfilagem ultrassônica podem sofrer na captação dos dados de raio interno e espessura do revestimento e que influenciam na determinação do desgaste. Dessa forma, as principais fontes de incertezas em são:

- I. Incerteza na medida original do tubo (antes do desgaste);
- II. Excentricidade da ferramenta;

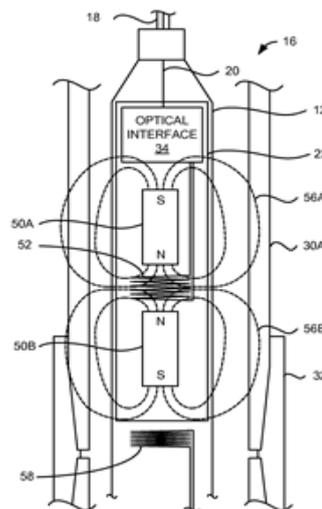
III. Interferência das medidas devido regiões de conexão entre tubos;

Na investigação do desgaste de um poço executado, pode-se gerar um perfil de desgaste do poço. No entanto, no poço existem regiões de conexão entre tubulares, que por sua vez possuem geometrias complexas e que podem gerar problemas para a quantificação do desgaste ou mesmo gerar valores de desgaste não realísticos. Para contornar isso, é necessário utilizar junto com os dados de raio interno e espessura informações de outros sensores que indicam a localização dessas regiões.

2.3.3 Instrumento auxiliar ao processo de perfilagem

A técnica de identificação de conexões entre tubulares usando equipamentos descidos no poço foi desenvolvida inicialmente em meados da década de 1940. Como expresso por Alvarez (2018), a simplicidade, o baixo custo e a eficiência tornaram a utilização deste equipamento um procedimento regular e que não sofreu mudanças significativas ao longo dos anos. A configuração mais comum do equipamento consiste no acoplamento de um par de ímãs permanentes colocados em lados opostos e separados por bobinas, ambos condensados em corpo cilíndrico compacto e decido à cabo no poço (SHARP et al. 2013). A Figura 12 apresenta a configuração de um equipamento utilizado para localizar conexões.

Figura 12 - Esquema de funcionamento de um equipamento localizador de luvas



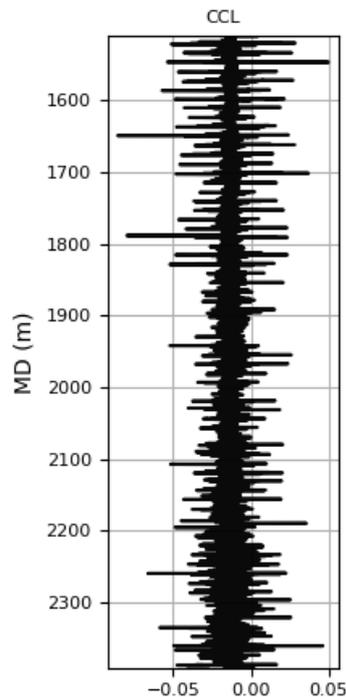
Fonte: SHARP et al. (2013)

A Figura 12 ilustra ainda as linhas de campo magnético gerado pelos ímãs e que passam diretamente pelas bobinas. As linhas de campo são perturbadas na região entre os tubulares devido o ganho de massa causados pelas luvas. Seguindo o princípio de indução magnética, a

variação do campo ocasiona corrente nas bobinas e ao ser amplificado, o sinal provoca a geração de um pico característico no perfil. Mudanças no campo magnético induz pulsos positivos ou negativos a depender da excitação das linhas de campo.

A estratégia para utilização dos dados de perfilagem consiste, portanto, em identificar os sinais referentes aos picos encontrados no perfil. Esses picos são as profundidades do poço associadas a regiões de conexão e estão ilustrados na Figura 13 que apresenta o perfil CCL do trecho de um poço. Quando o perfil é correlacionado ao de perfilagem ultrassônica, tem-se que os pontos de picos do perfil CCL indicam os pontos a serem eliminados nos dados geométricos do tubo. Para efetuar a remoção utiliza-se de valor limite de corte para trincar os valores elevados em absoluto. Esse valor é determinado apropriadamente através da análise das informações geradas diretamente pelo equipamento utilizando o perfil resultante. Considerando possíveis variações abruptas do campo magnético, os pontos entre dois picos também são eliminados.

Figura 13 - Perfil de localização de luvas de revestimento (CCL)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

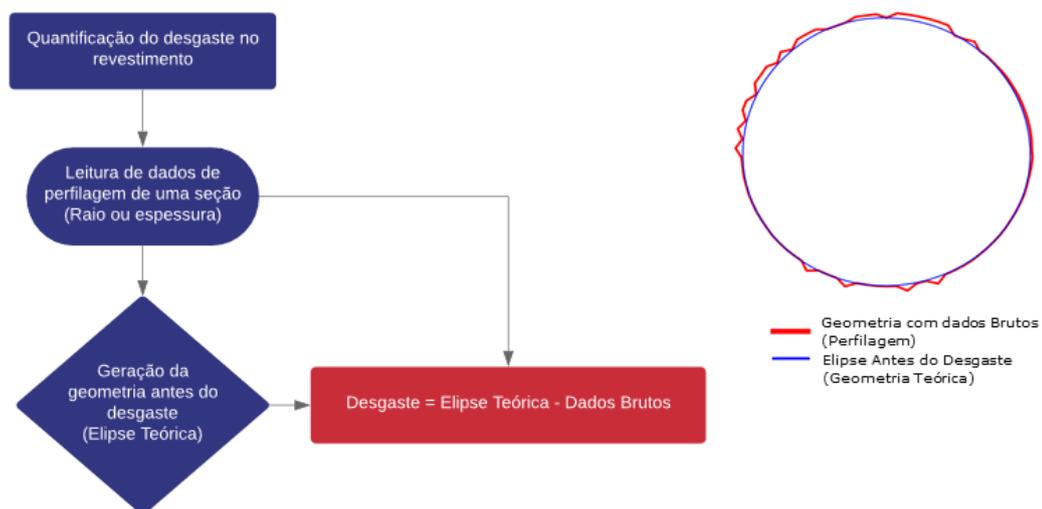
2.4 QUANTIFICAÇÃO DE DESGASTE

2.4.1 Método de quantificação da literatura

Os dados obtidos do instrumento de perfilagem não são suficientes sozinhos para quantificar o desgaste de maneira precisa. A remoção de material é determinada pela comparação com a geometria antes e após a ocorrência das chamadas canaletas de desgaste e, uma vez que os dados nominais do tubo não capturam as imperfeições fabris (ovalização e excentricidade) e a condição exata do tubular assentado, esta quantificação não é trivial. Dessa forma, o registro preciso das dimensões do revestimento anterior ao desgaste seria necessário, uma vez que, pela comparação dos pontos medidos antes e depois do desgaste seria suficiente para quantificar a perda de material pelo contato da coluna de perfuração com o revestimento de maneira mais precisa. Porém como há dificuldades operacionais de obter os valores antes e após o desgaste para um mesmo conjunto de pontos de uma seção transversal, como expresso em Chandrasekhar et al. (2019), um caminho para tratar essas dificuldades é utilizar técnicas de ajuste aos dados de perfilagem na tentativa de encontrar a geometria teórica que se assemelhe as condições do tubo assentado.

Dessa forma, em Chandrasekhar et al. (2019) é apresentada técnica de geração de uma geometria elíptica teórica definida a partir de 6 parâmetros e que é implementada utilizando o método dos mínimos quadrados através da solução de sistemas não lineares utilizando o método de Newton. A Figura 14 a seguir apresenta fluxograma simplificado com a lógica da metodologia de ajuste.

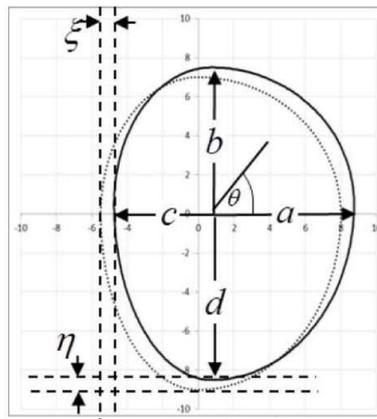
Figura 14 - Fluxograma simplificado da metodologia de ajuste de elipse



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Dessa forma, este método geométrico consiste, mais especificamente, na leitura de dados de espessura ou raio interno obtidos de um aparelho de perfilagem e que determina parâmetros ótimos para geometrias elípticas distorcida e deslocada que melhor se adequam aos dados de perfilagem lidos, seja com raio interno ou com a espessura do tubular. O ajuste com geometria elíptica de 6 parâmetros (os quatro semieixos da elipse e os deslocamentos em x e y que existem para considerar a descentralização do equipamento de medição) pode ser utilizado para dados de raio interno e também dados de espessura utilizando a medida de diâmetro externo, quando necessária para determinação na Figura 15 é apresentado o modelo utilizado de uma elipse distorcida e deslocada para ajuste de dados de raio.

Figura 15 - Modelo de elipse com 6 parâmetros



Fonte: Chandrasekhar et al. (2019).

As expressões analíticas em coordenadas cartesianas que são apresentadas no trabalho mencionado são apresentadas na Equação (3) e Equação (4) abaixo:

$$x(\theta, a, c, \xi) = \xi + \left(\left[1 - H\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) + H\left(\theta - \frac{3\pi}{2}\right) \right] a + \left[H\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) - H\left(\theta - \frac{3\pi}{2}\right) \right] c \right) \cos \theta \quad (3)$$

$$y(\theta, b, d, \eta) = \eta + \left([1 - H(\theta - \pi)] b + H(\theta - \pi) d \right) \sin \theta \quad (4)$$

Nas expressões acima, a, b, c, d são os semieixos da elipse e ξ, η são os deslocamentos em x e em y. A função H, usada na Equação (3) e na Equação (4) é a função *Heaviside* (função que é zero se o argumento é negativo e 1 se o argumento é positivo) que atua como forma de realizar um *switch* entre os semieixos diferentes, provocando a distorção entre os quatro quadrantes. Definidas as coordenadas do modelo, define-se o raio $R(\theta, a, b, c, d, \eta, \xi)$ desta elipse da seguinte forma:

$$R(\theta, a, b, c, d, \eta, \xi) = \sqrt{x(\theta, a, c, \xi)^2 + y(\theta, b, d, \eta)^2} \quad (5)$$

O método dos mínimos quadrados, que é um método de otimização matemática de ajuste, é aplicado definindo-se a função erro. Primeiramente, considera-se a variável X como vetor que contém os 6 parâmetros mencionados, como pode ser identificado na Equação (4). Dessa forma, o problema consiste em encontrar o conjunto de parâmetros que minimize a função erro definida na Equação (5).

$$X = [a, b, c, d, \xi, \eta] \quad (6)$$

$$\varepsilon(x) = \sum_{i=1}^N w_i [R(\theta_i, X) - r_i^{USI}]^2 \quad (7)$$

Na Equação (7), o fator w_i é igual a unidade por padrão, porém é utilizado para eliminar os pontos prováveis de desgaste para melhorar a precisão do ajuste, caso este em que o valor de w_i é zero. $R(\theta, X)$ corresponde ao valor do raio teórico que depende de todas os parâmetros mencionados e r_i^{USI} são o raio interno obtido da perfilagem.

Como mencionado anteriormente, a metodologia também é aplicada aos dados de espessura do revestimento. Nesse caso, a obtenção dos parâmetros ajustados através da Equação (7) é feita definindo a variável r_i^{USI} como r_i^{wt} . A variável r_i^{wt} consiste em um artifício definido como apresentado na Equação (8), onde utiliza-se o diâmetro externo do tubo (OD) e wt_i^{USI} que é a espessura obtida diretamente da perfilagem:

$$r_i^{wt} = \frac{OD}{2} - wt_i^{USI} \quad (8)$$

O problema de ajuste é resolvido através do método de Newton, que é um método numérico iterativo aplicado na resolução de sistemas não lineares. Com a solução, obtém-se os parâmetros da elipse e define-se com isso os pontos correspondentes a cada leitura de perfilagem, o que permite determinar o desgaste. A expressão utilizada para calcular a taxa de desgaste (ω) é dada na Equação (9).

$$\omega = \frac{\delta}{t_{wall}} = \frac{t_{antes} - t_{apos}}{t_{wall}} \quad (9)$$

Na Equação (9), δ é a diferença entre a medida teórica (geometria elíptica) e a real obtida da perfilagem, seja entre os raios teóricos e reais ou entre as espessuras teóricas e reais. A variável t_{wall} é a espessura nominal ou a espessura estimada, definindo dessa forma, o desgaste nominal, cuja taxa relaciona ainda a medida nominal de espessura do tubo, ou o desgaste medido, que utiliza a espessura obtida da geometria teórica gerada.

Com a elipse teórica definida, é possível obter valores de desgaste, bem como estimativa de imperfeições geométricas fabris como a ovalização e a excentricidade, uma vez que, por este método determina-se a geometria teórica que se assemelha às condições do tubo assentado antes de sofrer desgaste.

2.4.2 Metodologia geométrica aprimorada

O método desenvolvido em Chandrasekhar et al. (2019) aplica uma formulação matemática robusta para o problema de ajuste, pois leva em conta problemas que naturalmente estão presentes nos dados de perfilagem, como por exemplo, a centralização da ferramenta e distorções presentes na geometria de um tubular assentado. Essas considerações são levantadas na definição da geometria teórica quando é incluído vários parâmetros a serem ajustados para uma geometria elíptica.

Os modelos numéricos são melhorados quando é possível encontrar formas de generalizar ainda mais o modelo em questão para representar melhor os casos reais. Assim, tendo em vista a possibilidade da direção da ovalização ser variável ao longo da seção transversal, e com a possibilidade dessa imperfeição aumentar significativamente no ambiente extremo do tubo assentado, pode-se argumentar que a metodologia apresentada em Chandrasekhar et al. (2019), pode apresentar problemas, visto que a solução da distorção dos quadrantes não é suficiente para capturar ovalizações extremas que podem ocorrer em uma direção qualquer. Uma solução é aumentar os graus de liberdade da geometria a ser ajustada, ou seja, criando um novo parâmetro que capture melhor essa ovalização elevada que pode ocorrer nas seções e conseqüentemente tornar o método de ajuste por elipse mais concordante com os dados da perfilagem.

A Equação (6), apresentada anteriormente, que referencia as variáveis a serem obtidas no problema de ajuste resulta agora na seguinte expressão:

$$X = [a, b, c, d, \xi, \eta, \alpha] \quad (10)$$

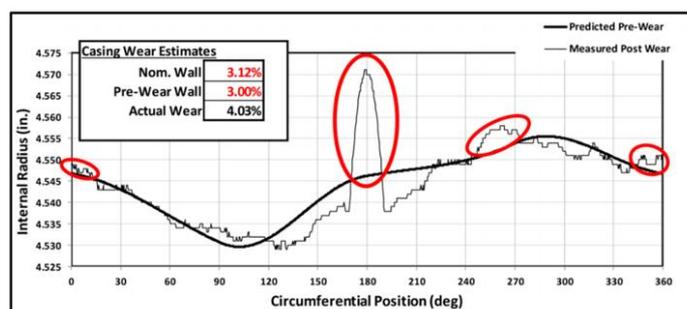
Assim, é feito um aprimoramento nas equações apresentadas anteriormente para adicionar o parâmetro de rotação α como apresentado na Equação (11) abaixo:

$$R(X, \theta)^2 = (x(\theta - \alpha, a, c) \cos \alpha - y(\theta - \alpha, b, d) \sin \alpha + \xi)^2 + (y(\theta - \alpha, b, d) \cos \alpha + x(\theta - \alpha, a, c) \sin \alpha + \eta)^2 \quad (11)$$

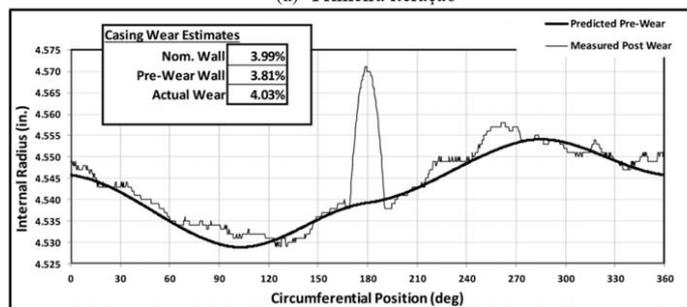
2.4.3 Geometria pré-desgaste e o ruído do equipamento

A geometria pré-desgaste definitiva não consiste simplesmente na resolução do problema de ajuste através da obtenção dos parâmetros ótimos (Equação (6) ou Equação (10)) que minimizam a função erro (usando a elipse apresentada em Chandrasekhar et al. (2019) ou a função aprimorada proposta neste trabalho). A Equação (7), que define a função erro, introduz, como mencionado, um fator w_i que assume valor nulo para os prováveis pontos de desgaste, que são os pontos que ficam acima da elipse teórica quando trabalha-se com dados de raio interno (pois o desgaste resulta em aumento das medidas de raio), ou abaixo, quando os dados são de espessura (o desgaste resulta em diminuição das medidas de espessura), sendo os demais pontos são definidos como $w_i = 1$. Dessa forma, esse processo é iterativo e resulta finalmente em curvas onde o desgaste é quantificado com maior precisão. A Figura 16 ilustra o processo.

Figura 16 - Duas iterações para obtenção da geometria antes do desgaste.



(a) Primeira iteração



(b) Segunda iteração

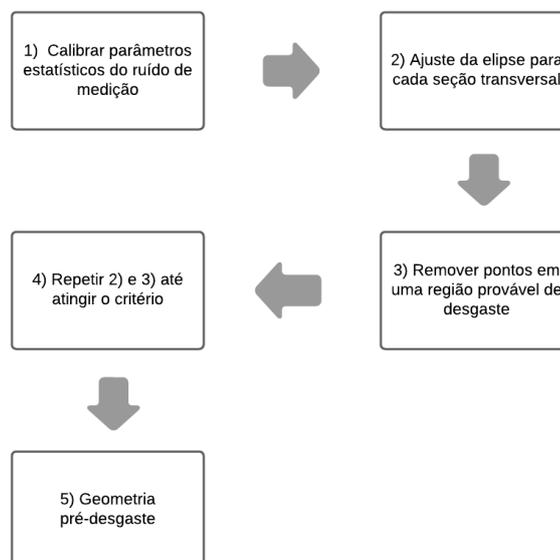
Fonte: CHANDRASEKHAR et al. (2019)

Na Figura 16 é possível perceber a presença de uma canaleta de desgaste. A geometria elíptica teórica em (a) é obtida com um único ajuste, de onde é possível perceber que a curva teórica é influenciada por essa região e a curva levanta, devido a presença dos pontos da canaleta. Em (b), realiza-se a segunda iteração, os pontos de desgaste (acima da curva teórica – pois são dados de raio interno) são eliminados e o ajuste aproxima melhor a geometria antes do desgaste, uma vez que desconsidera os pontos pertencentes ao desgaste.

Essa metodologia, no entanto, deve ser utilizada levando-se em conta o ruído presente nos dados de perfilagem. Como expresso em Chandrasekhar et al. (2019), com níveis de desgaste menores, a precisão da quantificação do desgaste é superestimada, uma vez que, nesse caso, a variação do ruído do instrumento pode levar a interpretação de valores maiores do que realmente está presente na seção. Em termos de precisão, o nível de desgaste confiável deve ser analisado considerando a razão sinal-ruído de uma seção.

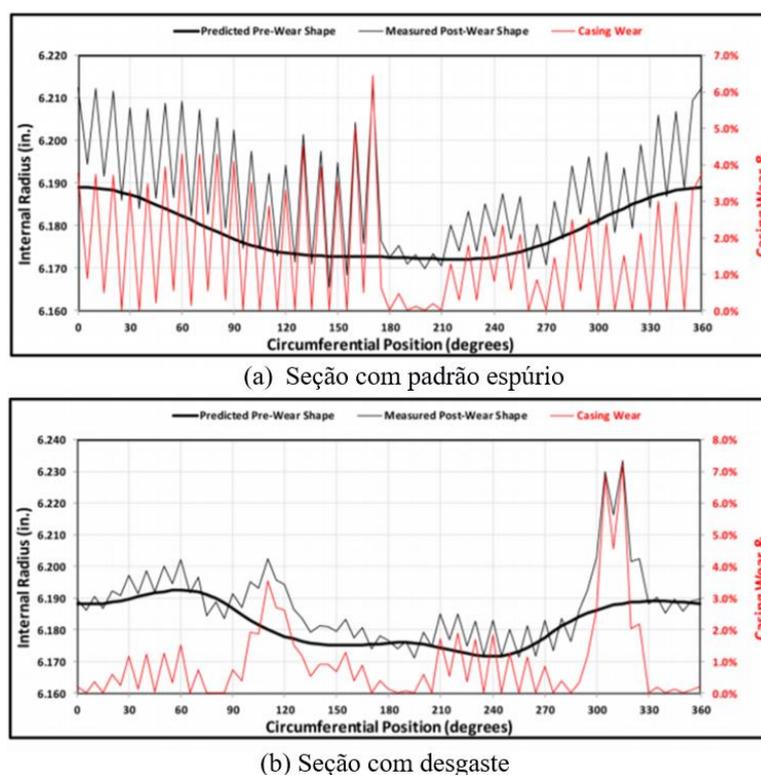
Estimar o nível de ruído presente nas seções além de possibilitar verificar se os níveis de desgaste determinados são confiáveis, também, em termos práticos, pode ser incluído na determinação da geometria pré-desgaste, uma vez que a condição de parada nas iterações deve ser calibrada com o conhecimento da amplitude do ruído presente na região do poço. O fluxograma da Figura 17 apresenta a estratégia para determinar a geometria pré-desgaste incluindo o ruído.

Figura 17 - Macroetapas da metodologia de geração da geometria pré-desgaste



Como apresentado ainda em Chandrasekhar et al. (2019), reconhecer os parâmetros do ruído pode ajudar a separar seções onde perceptivelmente o valor do desgaste não reflete uma região com dano, mas uma seção com padrão espúrio. Problemas de aquisição do equipamento, seções pertencentes a uma conexão entre tubos não filtrada usando os equipamentos CCL, como citado anteriormente, podem ser a causa desses padrões de dispersão não usuais. A Figura 17 a seguir apresenta exemplo de duas seções com níveis de desgaste semelhantes, porém com uma das seções (a) apresentando um padrão de dispersão espúrio, onde o valor de desgaste quantificado reflete menor confiança, já em (b) o nível de desgaste quantificado tende a refletir de forma mais confiável um dano presente em uma seção.

Figura 18 - Comparação entre seções com diferentes níveis de ruído



Fonte: CHANDRASEKHAR et al. (2019)

2.5 MÉTODO PARA VERIFICAÇÃO DE RESULTADOS: SEÇÕES VIRTUAIS

O desenvolvimento de melhorias nas estratégias de ajuste apresentadas é feito através de verificações exaustivas com seções transversais virtuais. A estratégia para geração dos tubos virtuais, que consistem em conjuntos de dados de raio interno e espessura criados para representar os dados obtidos dos instrumentos de perfilagem ultrassônica são apresentadas nessa seção. Esses tubos virtuais são gerados por algoritmos que aplicam as propriedades

geométricas próprias dos tubos assentados obtidos em uma perfilagem, porém possuem ovalização, excentricidade e desgaste pré-definidos. Ruídos com parâmetros estatísticos conhecidos podem ser adicionados para tornar esses dados ainda mais próximos das seções reais medidas por perfilagem.

Nesse caso, estudos estatísticos com milhares de seções de poços reais podem ser realizados para calibrar e aproximar o nível de ruído adicionado aos tubos virtuais ao que realmente se obtém em dados reais. Os algoritmos utilizados para geração dessas seções virtuais são utilizados na medida de qualidade das metodologias de quantificação de desgaste, ou também em estudos comparativos para desenvolvimento de outras metodologias.

2.5.1.1 Geração de seções ovalizadas e excêntricas

A ovalização da seção transversal é quantificada em termos do diâmetro máximo, do mínimo, e do diâmetro médio da superfície externa (OD_{max} , OD_{min} , OD_{ave}), como já mencionado na seção 2.1 essas medidas são utilizadas na equação para o cálculo da ovalização (1) pela norma. Considerando isso, a superfície externa de um tubo virtual ovalizado é definida como uma elipse determinadas pela Equação (11) sendo que os parâmetros geométricos são correspondentes aos fornecidos nas Equações (12) e (13) abaixo. Além disso, OD_{ave} é adotado como o OD nominal do tubo, sendo definido também como a média de OD_{max} e OD_{min} para simplificar a geração dos tubos virtuais.

$$a = c = \frac{OD_{ave} k_{ov}}{1 + k_{ov}} \quad (12)$$

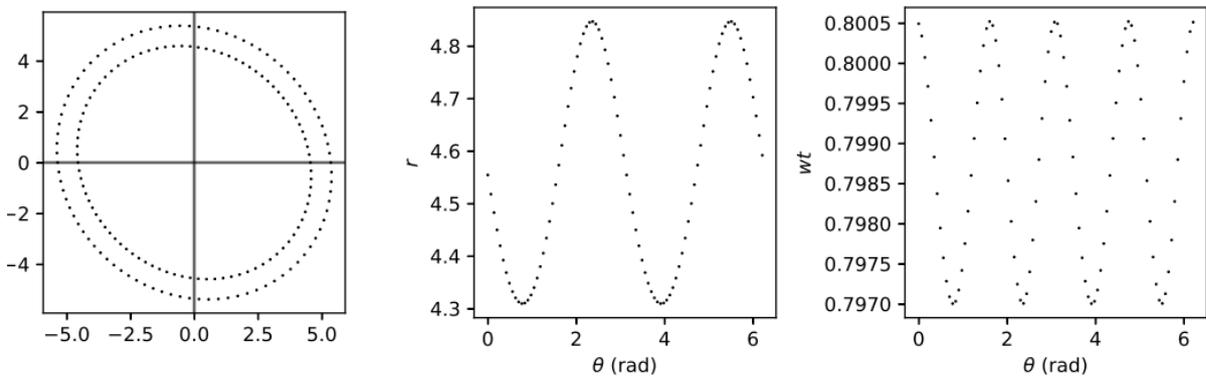
$$b = d = OD_{ave} \left(1 - \frac{k_{ov}}{1 + k_{ov}} \right) \quad (13)$$

Nas equações o parâmetro k_{ov} é determinado pela Equação (14) fornecida abaixo. Pode-se alterar o valor de α na Equação (11) para alterar a direção da ovalização no tubo virtual.

$$k_{ov} = \frac{2 + ov}{2 - ov} \quad (14)$$

A definição de ovalização é aplicada à superfície externa, adota-se a elipse externa como aquela que é gerada utilizando a Equação (12) e Equação (13). A elipse é obtida descontando a espessura da parede gerada pelos parâmetros a , b , c e d . Apesar da superfície interna e externa estarem centralizadas na mesma posição, o processo de geração dessas elipses ainda resulta em algum nível pequeno de excentricidade. A figura 16 apresenta uma imagem com um tubo virtual com ovalização imposta de 10.00%, a ovalização alcançada pelo processo proposto é de 10.01%, em relação a excentricidade neste caso foi imposto 0.0% porém obteve-se 0.44%.

Figura 19 - Tubo virtual com ovalização imposta



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Uma seção transversal excêntrica é criada movendo o centro da superfície externa para uma posição transladada, definida por um vetor $\vec{\Delta} = (\Delta X, \Delta Y)$. Isso é feito fazendo $\xi = \Delta X$ e $\eta = \Delta Y$, como os parâmetros de translação da geometria externa. Então o ângulo assumido nas direções de máxima e mínima espessura é de 180 graus. A máxima espessura define a posição da excentricidade na seção transversal do tubo θ_{ecc} . Posteriormente, wt_{ave} é adotada como a espessura nominal wt do tubo e é definida inicialmente como a média de wt_{max} e wt_{min} para simplificar o procedimento de geração dos tubos. Finalmente, usando essas suposições e combinando com a Equação (2), obtêm-se a Equação (15) e Equação (16) apresentadas abaixo.

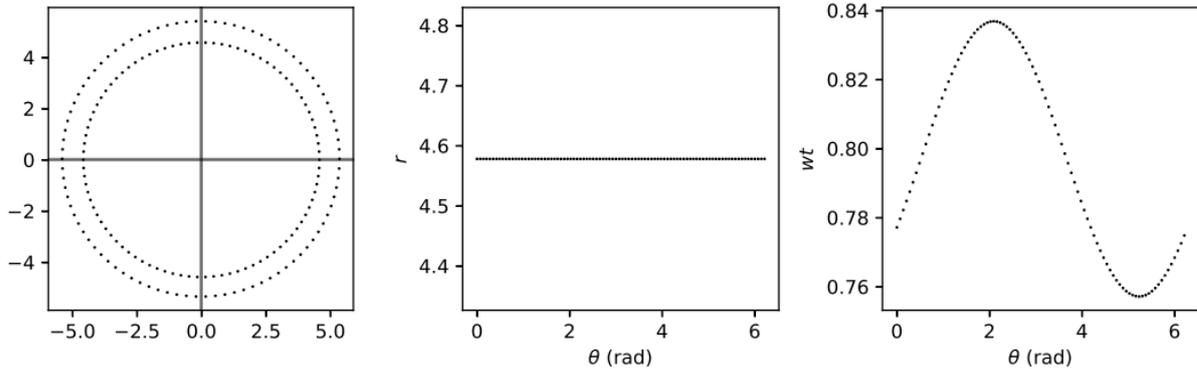
$$\xi = \Delta X = \cos \theta_{ecc} \left(\frac{ecc}{4} wt \right) \quad (15)$$

$$\eta = \Delta Y = \sin \theta_{ecc} \left(\frac{ecc}{4} wt \right) \quad (16)$$

Devido às diferentes definições de wt_{ave} , pequenos erros são esperados após a geração de um

tubo virtual excêntrico. A figura abaixo apresenta um exemplo de tubo virtual com excentricidade imposta de 10,00%. Após o processo de geração foi detectado um valor de excentricidade de 9,999%. Ovalização foi imposta como zero, e permanece zero após a geração do tubo virtual.

Figura 20 - Tubo virtual excentricidade imposta



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

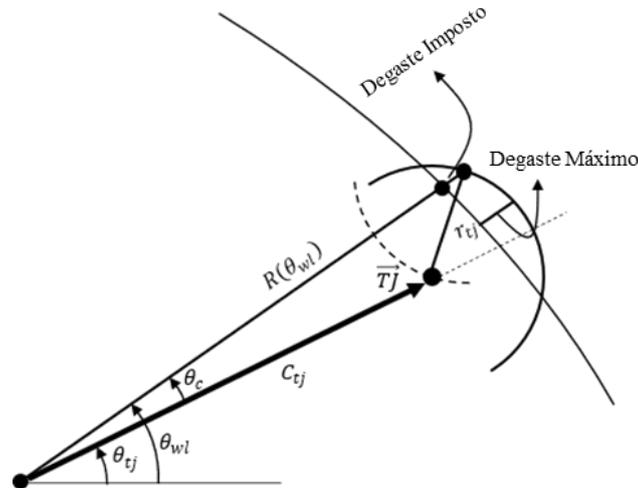
2.5.1.2 Inserção de canaletas de desgaste

Para gerar a geometria desgastada, assume-se que o desgaste é aquele causado por uma *tool joint*. Nesse caso, é formado um pequeno setor circular dentro de uma seção transversal não desgastada, que é denominado como canaleta.

Para gerar as seções com canaletas é preciso recorrer a relações trigonométricas para determinar a correta posição da *tool joint* simulada que gera uma canaleta imposta. Dessa forma, seja $\vec{T}_j = (C_{ij} \cos \theta_{ij}, C_{ij} \sin \theta_{ij})$ o vetor que define a posição do centro da *tool joint*, e seja r_{tj} o raio externo da *tool joint*. Então, a relação dada na Equação (17) pode ser obtida através de deduções baseadas na relação apresentada na Figura 18.

$$C_{ij} = (R(\theta_{wt}) + wear) \cos \theta_c - \sqrt{r_{tj}^2 - (R(\theta_{wt}) + wear)^2 \sin^2 \theta_c} \quad (17)$$

Figura 21 - Relações geométricas na canaleta de desgaste

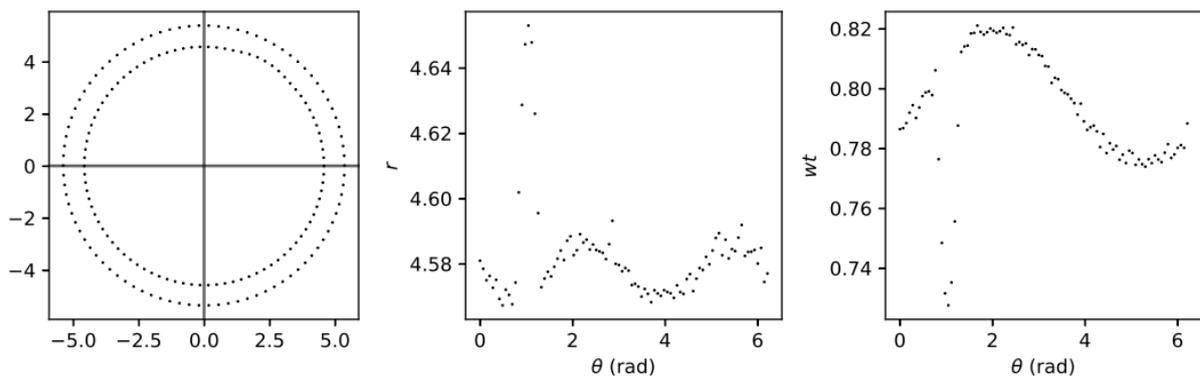


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Analisando a figura, percebe-se que o problema é definido de forma que o centro da *tool joint* seja movido até que o máximo desgaste medido seja igual ao desgaste imposto.

A figura apresenta tubo virtual com desgaste imposto de 10.000%, o desgaste alcançado foi de 10.000%. Também foi imposto ovalização de 0.3%, onde o valor alcançado foi de 0.2998%. A excentricidade imposta no tubular foi de 5.5%, a excentricidade alcançada foi 5.4998%.

Figura 22 - Tubo virtual com canaleta imposta



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

2.5.1.3 Geração de poços virtuais para benchmark

O algoritmo de tubos virtuais desenvolvido é utilizado em testes exaustivos onde milhares de tubos virtuais são gerados. Esses conjuntos de dados servem como um *benchmark*

nos estudos para aperfeiçoamento das técnicas de ajuste empregadas na ferramenta de quantificação de desgaste, ovalização e excentricidade. As várias seções geradas podem apresentar diversas características impostas, como níveis de desgaste, a posição da canaleta, assim como a inserção ou não das imperfeições como ovalização e excentricidade, de forma separada ou em conjunto. Outra característica importante que pode ser avaliada e imposta nas seções virtuais é o ruído de medição. Sabe-se que o instrumento de medidas ultrassônico possui ruído, dessa forma, validar as metodologias de quantificação considerando o nível desse ruído contribui na melhoria dos parâmetros de ajuste do método.

Quando níveis de ruído também são inseridos, aproxima-se as seções virtuais das seções reais, e é possível realizar uma análise de erro estatístico das estratégias de quantificação de desgaste ou na estimativa das imperfeições geométricas. Assim, uma vez caracterizado os parâmetros estatísticos do ruído de medição nos dados de perfilagem, é possível inserir ruído de caráter aleatório e com mesma distribuição estatística nas seções virtuais.

2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DADOS

A estatística é definida segundo Larson e Farber (2010) como a ciência que coleta, organiza, analisa e interpreta dados para a tomada de decisões. Nesse sentido, a estatística possui grande aplicação dentro da engenharia como um todo. Como expresso por Ang e Tang (2007), ao lidar com problemas do mundo real, por exemplo, surgem incertezas que são inevitáveis, e a estatística acaba sendo uma ciência fundamental para fornecer métodos para conceber, formular e criar modelos para lidar com essas incertezas. Além disso, outra aplicação é a possibilidade de desenvolver simulações e estimar comportamento de sistemas complexos. Numerosas técnicas estatísticas podem ser aplicadas na interpretação das informações extraídas de uma grande quantidade de dados, como aqueles obtidos de instrumentos de medição, de pesquisa de qualidade e de séries históricas.

Do ponto de vista da análise estatística, os dados podem ser amostrais ou populacionais. Como frequentemente não é possível estudar uma população, por ser impraticável observar todo um grupo com grande quantidade de elementos, a estatística oferece métodos para fazer inferências sobre a população através de subconjuntos desta população, que são as amostras. Dessa forma, divide-se a estatística em estatística inferencial e descritiva. A estatística descritiva procura analisar e descrever um certo grupo sem procurar fazer inferências sobre um grupo maior, e nesse contexto, aspectos relacionados a frequência dos dados e sua dispersão,

para citar algumas características, são informações analisadas. A estatística inferencial consiste em aplicar técnicas para obter informações sobre os dados populacionais e caracterizá-los apenas utilizando os dados amostrais. (LARSON e FARBER, 2010; PEDROSA e GAMA, 2004).

2.6.1 Ferramentas da Estatística Descritiva

Geralmente a análise prévia de dados começa na interpretação das estatísticas amostrais utilizando as medidas descritivas. Como expresso em Pedrosa e Gama (2004), essas medidas descritivas apresentam três categorias: medidas de posição ou localização, medidas de variabilidade e medidas de assimetria.

As medidas de posição e dispersão são particularmente importantes para caracterizar conjuntos de dados. Enquanto as medidas de posição permitem determinar valores típicos que representam todas as entradas de dados, as medidas de dispersão oferecem valores para quantificação da variabilidade, indicando uma maior ou menor aproximação dos dados analisados em relação à média. Geralmente ambas medidas se complementam sendo bastante utilizadas em conjunto para caracterizar estatisticamente um conjunto de dados. A Equação (18) e Equação (19) indicam as expressões clássicas para o cálculo da média e para o desvio padrão, que são as principais medidas de posição e de dispersão respectivamente. Nessas expressões x_i corresponde aos valores individuais presentes na amostra e \bar{X} corresponde à média da amostra.

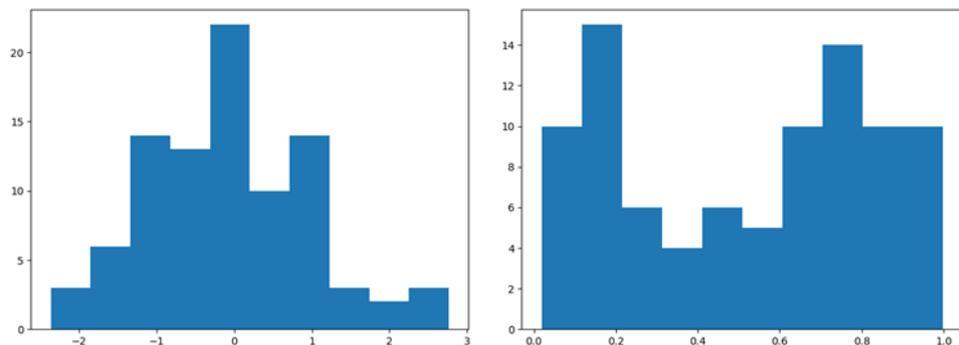
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (18)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (19)$$

Uma outra medida de posição, além da média, e que é relevante é o percentil. O percentil divide um conjunto de dados ordenados em 100 partes iguais, análogo a medida conhecida como quartil, que divide os dados em 4 partes iguais. Essa medida fornece o valor típico de um conjunto baseado na porcentagem de valores menores. Dessa forma, o percentil de ordem k ($k = 1, 2, \dots, 99$) denotado por p_k , indica que cerca de $k\%$ das observações são menores que p_k .

Ferramentas gráficas também são úteis para caracterizar melhor os dados. É o caso do histograma, nesse tipo de gráfico pode-se entender a dispersão dos dados através do agrupamento desses dados em classes, sendo que o arranjo dos elementos da amostra nessas classes é denominado distribuição de frequências, e o histograma é uma forma gráfica de representar essa distribuição. Na Figura 23 são apresentados exemplos de histogramas com diferentes distribuições de frequência, visível pela diferença de forma dos gráficos.

Figura 23 - Exemplo de histogramas com diferentes distribuições



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Todas essas medidas de caracterização e também os gráficos aplicados aos dados ajudam a definir o tipo de distribuição estatística. Uma distribuição particularmente importante na estatística é a distribuição gaussiana ou simplesmente, distribuição normal. A distribuição normal possui propriedades que a tornam especiais para a estatística, especialmente a sua simetria além de ser representada e quantificada com as medidas citadas de média e desvio padrão (MIOT, 2017).

Como exposto por Miot (2017), o primeiro passo para avaliação da normalidade de um conjunto de dados deve ser a visualização de seu histograma, por onde pode-se identificar assimetrias, discontinuidades de dados e picos multimodais. É importante fazer a análise e poder identificar a distribuições dos dados analisados para que seja possível valer-se das propriedades pertencentes a uma determinada distribuição.

2.6.2 Reconhecimento de valores discrepantes: *Outliers*

Como mencionado em Larson e Farber (2010), um outlier é uma entrada de dados tão discrepante ou afastada das demais entradas em um conjunto de dados. A estatística fornece métodos para identificar prováveis valores considerados como *outliers* dentro da análise de um conjunto de dados.

Um método clássico de identificação de outliers é o método do Z-score. Este método utiliza uma métrica estatística baseada na média e desvio padrão, atribuindo um valor relativo que indica a quantidade de desvios padrões que uma entrada representa dentro do conjunto de dados e qual seria o valor máximo a partir do qual essa entrada pode ser considerada um valor discrepante, na literatura geralmente se enquadra entre -3 e +3 desvios padrão, intervalo onde 99,8% dos dados se encontram, então, como expresso em Larson e Farber (2010) esses valores são considerados extremamente incomuns. Como apresentado em Seo (2006) e Larson e Farber (2010) o valor do Z-score é determinado conforme a Equação (20).

$$z = \frac{(x - \mu)}{\sigma} \quad (20)$$

O método de *Tukey*, também conhecido como método *boxplot*, é amplamente utilizado para tratamento de dados afim de detectar os outliers. Como mencionado em Seo (2006), este método não assume qualquer distribuição estatística e nem depende da média e desvio padrão dos dados, no entanto é robusto quando aplicado à grande quantidade de dados cuja distribuição é normal.

O método consiste em utilizar limites inferior e superior através do cálculo do interquartil (IQR) e do primeiro e terceiro quartil, de forma que os dados que se encontram além desses limites são definidos como outliers. A Equação (21) e a Equação (22) definem os cálculos das fronteiras inferior e superior através dos quartis, de onde Q1 e Q3 (25° percentil e 75° percentil) são o primeiro e terceiro quartil e no qual o IQR é definido como a diferença entre os valores de Q3 e Q1.

$$L_{\text{inf}} = Q_1 - (1.5IQR) \quad (21)$$

$$L_{\text{sup}} = Q_3 + (1.5IQR) \quad (22)$$

2.6.3 Distribuições na estatística

Pedrosa e Gama (2004), afirmam que a probabilidade é a base da estatística inferencial, sendo que esta ocupa-se da medição das chances de ocorrências de um evento. Como mencionado, a estatística atua na análise e interpretação de dados, e esses dados podem ser frequentemente extraídos da medição de um fenômeno onde as ocorrências são de caráter aleatório, é necessário caracterizar, portanto, a distribuição das chamadas variáveis aleatórias. As variáveis aleatórias são valores numéricos associados ao resultado de um experimento de

probabilidade ou, em outras palavras, um valor numérico possível dentro do conjunto das possibilidades do fenômeno (evento amostral).

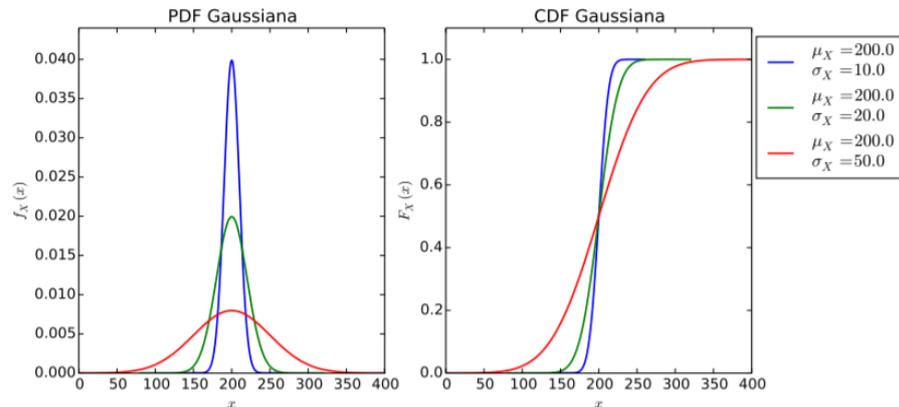
Nesse contexto, as amostras estudadas na estatística inferencial são frequentemente um conjunto de observações ou ocorrências de uma variável aleatória. A estatística inferencial, por sua vez, trata o estudo dessas amostras aleatórias através das distribuições de probabilidade, que são definidas como um modelo matemático que retorna a probabilidade de ocorrência para cada valor possível de uma variável aleatória. O interesse ao estudar as amostras aleatórias geralmente envolve a estimativa da distribuição da população, ou seja, determinar o modelo ou função matemática que representa a distribuição populacional.

A distribuição mais comum é a distribuição normal. Como mencionado anteriormente, a distribuição de frequência representada pelo histograma pode sinalizar, pela sua forma, se uma amostra apresenta dados condizentes com uma distribuição de probabilidade específica. Seguindo o exemplo da própria distribuição amostral, a Equação (23) apresenta a função densidade de probabilidade (*Probability Density Function* - PDF) que consiste na curva que caracteriza a distribuição de probabilidade de uma variável aleatória contínua, possibilitando associar probabilidades à intervalos de valores assumidos pela variável (LARSON e FARBER, 2010).

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2} \quad (23)$$

Essa expressão depende da média (μ_x) e do desvio padrão (σ_x) para ser caracterizada. A distribuição de uma variável aleatória também é descrita frequentemente pela chamada função de distribuição de probabilidades (*Cumulative Distribution Function* - CDF) e que associa a cada valor da variável aleatória a probabilidade de ocorrência de um valor menor ou igual ao da variável. Na Figura 24 são apresentadas as curvas PDF e CDF de uma variável aleatória com distribuição normal modificando os seus parâmetros.

Figura 24 - Exemplos de PDFs e CDFs



Fonte: GOUVEIA (2014)

2.6.4 Inferência Estatística: Testes de hipótese

O objetivo presente em uma análise inferencial é tomar decisões. Os métodos estatísticos existem para tornar esse processo mais confiável tendo em vista que naturalmente essas decisões serão tomadas em grande parte através de amostras de uma população maior. Neste contexto, esses métodos basicamente envolvem o processo de estimação de parâmetros e a avaliação de hipóteses levantadas para uma população. Os resultados dessas análises estão relacionados com as características da amostra, uma vez que diferentes amostras extraídas de uma mesma população podem conduzir a diferentes conclusões em uma avaliação inferencial. Esse fato é devido às amostras poderem ser representativas em maior ou menor nível e possuírem incertezas envolvidas no processo de amostragem, portanto, características como tamanho e medidas estatísticas, como as mencionadas, são importantes nessa estratégia.

Os chamados testes de hipótese são definidos, conforme apresentado em Pedrosa e Gama (2004), como um processo estatístico que é utilizado para extrair uma conclusão do tipo sim ou não sobre uma ou mais populações, a partir de uma ou mais amostras dessas populações. Esses métodos baseiam-se primeiramente na formulação das hipóteses a serem testadas e em seguida usar algum método estatístico para decidir entre as hipóteses testadas para tomar decisões (PEDROSA e GAMA, 2004). A condução genérica dos testes corresponde a definição das chamadas hipóteses nula e alternativa. A definição é dada abaixo:

- I. Hipótese nula (H_0): É a hipótese que julgamos inverossímil;
- II. Hipótese alternativa: É a hipótese que julgamos verossímil e que se pretende verificar.

Para realizar o teste apropriadamente é preciso quantificar as informações da amostra testada para que se possa aceitar ou rejeitar o teste de hipótese. Nesse caso, pode-se utilizar a estatística de teste, que corresponde a uma métrica própria de cada teste e que possibilita estabelecer uma relação de confiança estatística para a tomada de decisão. Também pode ser utilizada uma outra abordagem que é a determinação do chamado P-valor. O P-valor corresponde, ainda segundo ainda Pedrosa e Gama (2004), a um valor probabilístico que está relacionada à estatística de teste apresentar um valor tão extremo quanto o que representa os dados da amostra. Quando se estabelece os chamados níveis de significância do problema, ou seja, a probabilidade do risco de cometer um erro no teste de hipótese, pode-se ser feita uma comparação direta entre o P valor e o nível de significância para que seja possível determinar a resposta do teste com maior confiança.

Dentro dos testes de hipóteses temos os métodos paramétricos para teste, que são utilizados para quando é proposto testar um parâmetro de uma amostra com o respectivo parâmetro populacional ou testes que comparam parâmetros conhecidos entre populações diferentes. Além disso, temos os métodos não paramétricos, que não dependem de uma determinada distribuição e que especificamente podem ser usados para testar o ajuste de um conjunto de dados de acordo com uma distribuição especificada e nesse caso, são frequentemente denominados de testes de aderência.

Os testes de aderência que são baseados na função de distribuição empírica comparam a estimativa da função de distribuição acumulada de probabilidades (CDF) da amostra (a denominada: *Empirical Distribution Function* - EDF) com a CDF teórica, nesse caso, testando se há um bom ajuste entre esses dados baseados em certos critérios. Alguns dos mais populares testes desse tipo são, segundo Yap e Sim (2011), são *Kolmogorov-Smirnov*, *Cramér-von Mises* e *Anderson-Darling*.

2.6.5 Teste paramétrico *t-Student*

O teste *t-Student* é um teste paramétrico bastante utilizado para problemas que envolvem teste de hipótese relacionados a média populacional, seja para comparar as médias de populações distintas ou mesmo para testar a média amostral (Pedrosa e Gama, 2004). No chamado teste *t-Student* para uma amostra, temos que a amostra é caracterizada com um valor chamado de valor-t, para este tipo específico de teste o desvio padrão populacional é desconhecido, mas podemos testar a amostra baseado no valor da média populacional. A Equação (23) apresenta o valor-t utilizado no teste *t-Student* para uma amostra.

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (23)$$

A Equação (23) apresenta no numerador a diferença entre a média amostral \bar{x} e a média populacional μ_0 , no denominador é apresentado uma razão conhecida como erro padrão da média, onde s e n indicam o desvio padrão e o tamanho da amostra. Essa relação apresentada nessa equação pode ser entendida como uma expressão que qualifica os dados analisados em relação ao nível do erro aleatório presente. O valor-t torna-se, portanto, um indicador da diferença que é observada na amostra em relação a variabilidade dos dados. Então, com um nível de significância adotado pode-se testar a hipótese de os dados pertencerem a uma população com média μ_0 (MINITAB, 2019).

2.6.6 Teste não paramétrico: Kolmogorov-Smirnov (K-S)

O teste de *Kolmogorov-Smirnov* (K-S) é, segundo Ang e Tang (2007) um teste de aderência amplamente utilizado. Foi desenvolvido por Andrei Nikolaevich Kolmogorov (1903-1987) e posteriormente aprimorado por Vladimir Ivanovich Smirnov (1887-1974). A estatística de *Kolmogorov-Smirnov* quantifica a máxima distância vertical entre a função distribuição empírica da amostra e a função distribuição acumulada da teórica. Neste caso, pode ser utilizado em duas abordagens, quando se possui uma amostra e pretende-se determinar através dessa distância máxima a disparidade da distribuição amostral e a distribuição teórica de uma população; ou um teste entre duas amostras, para determinar se é possível aceitar a hipótese de ambas sejam retiradas de uma mesma população. A decisão tomada nesse teste é baseada sempre neste valor (que representa uma distância estatística), sendo este conhecido como estatística de teste. A estatística de teste para o teste KS é dado na Equação (24).

$$D_n = \max_x |F_x(x) - S_n(x)| \quad (24)$$

Na Equação (24), a $F_x(x)$ corresponde a curva teórica da distribuição e $S_n(x)$ a distribuição empírica baseada na amostra. Essa estatística de teste é comparada com valores críticos determinados considerando níveis de significância do problema. Para um nível de significância alto, o teste possui uma tolerância menor para as discrepâncias registradas.

A distribuição $F_x(x)$, para o teste de uma amostra, deve ser completamente especificada pelos parâmetros populacionais. A Equação (24) representa o que se estabelece como teste bilateral, onde a distância máxima testada pode ser para divergências positivas ou negativas.

2.6.7 Teste não paramétrico: *Cramér-von Mises* (CVM)

Cramér-von Mises foi um teste de aderência desenvolvido por Richard von Mises (1883-1953) e Harold Cramer (1893-1985) e, assim como teste K-S, consiste em um teste de aderência em que não é necessário quaisquer considerações sobre as distribuições dos dados analisados. Pode ser utilizado também em versões de teste para uma amostra ou de duas. A Equação (25), apresenta as expressões para a estatística de teste a ser comparada.

$$nw^2 = n \int_{-\infty}^{\infty} [F_n(x) - F^*(x)]^2 dF(x) \quad (25)$$

Percebe-se que no teste *Cramér-von Mises* (CVM), também utiliza-se a distância entre a distribuição teórica e empírica ($F^*(x)$ e $F_n(x)$), porém neste teste é levada em conta a distância quadrática. A Equação (25) pode ser computada mais facilmente através da Equação (26).

$$CVM = \frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^n \left(Z_i - \frac{2i-1}{2n} \right)^2 \quad (26)$$

Da mesma forma que no teste K-S, a estatística de teste apresentada é comparada com valores críticos com base em níveis de significância apropriados para o problema, levando a rejeição ou aceitação da hipótese de similaridade estatística.

2.6.8 Teste não paramétrico: *Anderson-Darling* (A-D)

O teste de aderência *Anderson-Darling* (teste A-D), foi apresentado formalmente no trabalho Anderson e Darling (1952), onde Theodore Wilbur Anderson (1918-2016) e Donald A. Darling (1915-2014) apresentam um teste estatístico que também pertence a classes dos métodos de aderência baseados na EDF e apresenta grande similaridade com o método de *Cramér-von Mises*, porque ambos são pertencentes ao grupo das estatísticas de testes quadráticas das EDF, pois como citado em Torman et al. (2005), ambos levam em consideração as diferenças quadráticas entre a distribuição empírica e a distribuição hipotética. Em Ang e Tang (2007), é destacado também que o teste A-D apresenta modificações que permitem que seja um método mais sensível do que o método CVM, pois, enquanto o CVM, e também o teste K-S, não utilizam distribuições específicas para o cálculo dos valores críticos, o método A-D utiliza a própria distribuição hipotética específica para determinar os valores críticos. Dessa forma, a desvantagem do teste, por um lado, é que os valores críticos tem que ser determinados

para uma distribuição específica.

Outro aspecto significativo que este método apresenta em relação aos demais é a maior importância em termos de precisão que é dada em relação as caudas da distribuição. Essa modificação é feita através da função peso aplicada à estatística do teste. A estatística do teste A-D é definida através da Equação (27).

$$AD = n \int_{-\infty}^{\infty} [F_n(x) - F^*(x)]^2 \psi(F(x)) dF(x) \quad (27)$$

Na Equação (27), a diferença quadrática $[F_n(x) - F^*(x)]^2$ surge novamente como parâmetro que representa a distância entre as distribuições, no caso, assim como em CVM, o termo $F_n(x)$ representa a distribuição observada (distribuição empírica que corresponde a amostra tratada) e $F^*(x)$ é a distribuição teórica. $\psi(F(x))$ é a função peso que tradicionalmente é definida de forma a conferir maior sensibilidade nas caudas da distribuição e pode ser definida pela Equação (28) como apresentado em Anderson e Darling (1954).

$$\psi(u) = \frac{1}{u(1-u)} \quad (28)$$

Ang e Tang (2007) apresentam o procedimento para realização do teste A-D, e também apresentando a expressão que é usada para computar a estatística de teste que é apresentada na Equação (29):

$$A^2 = - \sum_{i=1}^n \left[\frac{(2i-1) \{ \ln F_x(x_i) + \ln(1 - F_x(x_{n+1-i})) \}}{n} \right] - n \quad (29)$$

3 METODOLOGIA

A metodologia proposta consiste em desenvolver uma análise estatística com os dados de resíduos obtidos no ajuste numérico com a metodologia aprimorada, que é mencionada neste trabalho, e que aplica um parâmetro adicional de rotação à formulação apresentada em Chandrasekhar et al. (2019). Os resíduos são definidos neste trabalho como a diferença entre os dados determinados através da curva teórica ajustada e aqueles obtidos da perfilagem (reais ou simulados através dos tubos virtuais). Os resíduos são, portanto, determinados através das seguintes expressões:

$$res_i^{raio} = r_i^{USI} - R(\theta_i) \quad (30)$$

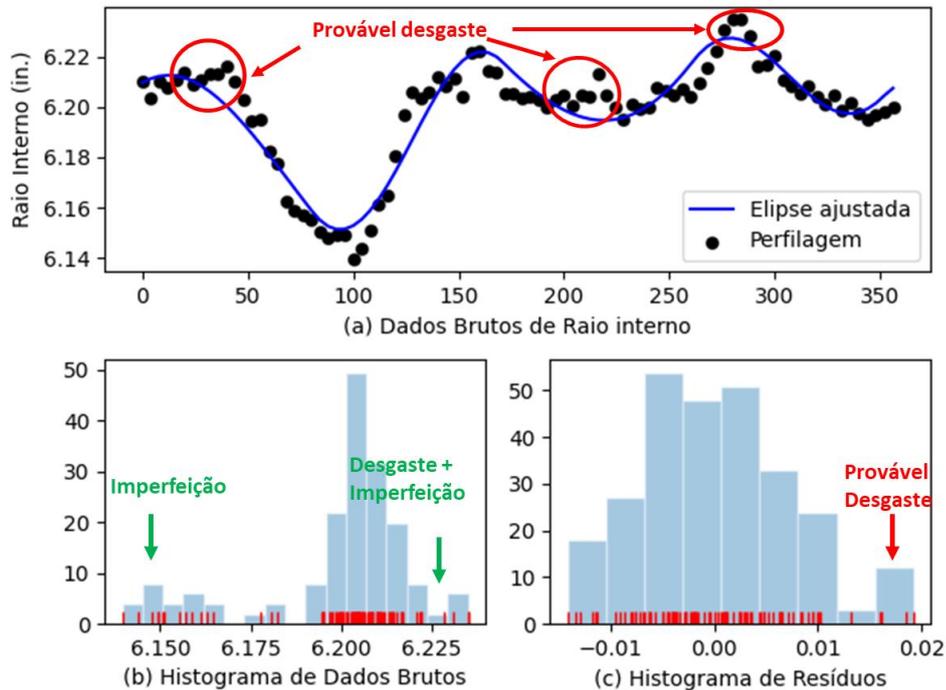
$$res_i^{esp} = WT(\theta_i) - wt_i^{USI} \quad (31)$$

Nessas expressões r_i^{USI} e wt_i^{USI} são as medidas de raio interno e espessura da perfilagem e as variáveis $R(\theta_i)$ e $WT(\theta_i)$ correspondem aos valores calculados pela elipse ajustada. O desgaste nas seções capturadas através das medidas de raio interno consiste em uma região onde as medidas de raio interno resultam maiores do que nas demais regiões radiais, no entanto, para as seções com medições de espessura o desgaste consiste em regiões com menores espessuras, dessa forma, a diferença entre as dimensões teóricas e as de perfilagem resultariam em resíduo negativo para dados de espessura e positivos para dados de raio interno. No entanto, definindo os resíduos conforme a Equação (30) e Equação (31) os valores positivos extremos são relacionados ao desgaste.

O conjunto de resíduo analisado corresponde aqueles obtidos no primeiro ajuste da elipse teórica. A tendência da curva ajustada é manter a mínima distância entre todos os pontos da perfilagem, e diferente do processo iterativo da metodologia de quantificação de desgaste mencionada neste trabalho (que prossegue efetuando novos ajustes), no primeiro ajuste não é removido nenhum ponto e a curva não sofre distorções que resultam em um maior deslocamento da curva para baixo (prejudicando a estimativa dos parâmetros do ruído).

Os dados brutos de perfilagem possuem muitas informações agrupadas, as variações nos dados podem ser devido a presença de imperfeições geométricas de ovalização e excentricidade, as variações causadas pelo ruído do próprio equipamento e o desgaste. Essa quantidade de informação dificulta, por exemplo, o estudo estatístico para identificação do desgaste. A Figura 25 apresenta uma seção real, onde é mostrado também os histogramas dos dados reais e dos resíduos.

Figura 25 - Informação em dados brutos de perfilagem e nos resíduos de ajuste



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

É possível identificar em (a) que a seção possui regiões de possível desgaste em pequena intensidade. Além disso, em (a) percebe-se o padrão sinuoso, com picos na curva elíptica ajustada, o que revela um nível maior de ovalização (como os dados são de raio interno, a imperfeição estimada é a ovalização). Se a canaleta de desgaste se encontra em região fora desses picos e em intensidade menor que a variação causada pela ovalização, a identificação do desgaste nas caudas do histograma fica prejudicada. Dessa forma, com os resíduos, a variação analisada é em relação à curva elíptica teórica, sendo que esses dados são mais facilmente analisados, uma vez que as variações observadas são geradas principalmente pelo ruído do equipamento e os danos por desgaste.

Espera-se que com a análise estatística seja possível estimar o nível de ruído presente em seções íntegras do poço na aquisição de dados, para com isso melhor identificar as seções íntegras e desgastadas. Com os parâmetros do ruído na aquisição de dados, utiliza-se os métodos estatísticos para buscar diferenciar de forma confiável as variações causadas por desgaste de variações aleatórias causadas pelo ruído e com isso classificar as seções com prováveis danos. Além disso, é possível interpretar melhor a distribuição de dados presentes em seções de corpo de tubo de seções cuja distribuição seja pertencente a região de conexão ou devido a problemas no processo de aquisição de dados. Essa classificação é complementar ao processo de

quantificação de desgaste, explorado em Chandrasekhar et al. (2019), uma vez que é possível determinar grau de confiança maior aos resultados do que apenas determinar uma taxa de desgaste para todas as seções, pois esta pode ser determinada para seções cuja distribuição não indiquem um tubular, mas seções espúrias.

Outra contribuição do estudo é a verificação da validade da remoção dos pontos de desgaste nas demais iterações dentro do método de quantificação de desgaste apresentado (obtenção da geometria pré-desgaste). Nesse sentido, pode-se verificar a qualidade da geometria resultante através de testes estatísticos com os parâmetros do ruído de medição estimado. Nesse caso, os testes são aplicados aos pontos não removidos pela metodologia. Além disso, como citado anteriormente, todas as verificações feitas com tubos virtuais para melhoria dos métodos de quantificação de desgaste são beneficiadas com a adição de níveis de ruído calibrados com os dados reais.

3.1 GERAÇÃO DE SEÇÕES VIRTUAIS

Para este trabalho são gerados poços virtuais, ou seja, milhares de seções com dados gerados pelo algoritmo de tubos virtuais comentado. Concentrou-se os estudos em três casos distintos: No caso 1, com dados sem imperfeições impostas; no caso 2, apenas seções ovalizadas; e no caso 3, seções com excentricidade. Cada caso é dividido em dados de raio e dados de espessura, onde para dados de raio atribui-se valores diferentes de ruído para raio e espessura, sendo que esses valores são impostos em todos os três casos. Além disso cada caso analisado inclui níveis de desgaste variados nas seções, e também a configuração da canaleta de desgaste é modificada, uma vez que se atribui dois valores distintos para o tamanho da *tool joint*. A seguir é apresentado a Tabela 1 com a quantidade de seções geradas para os estudos desenvolvidos nesse trabalho, considerando raio interno e espessura.

Tabela 1 - Quantidade de seções virtuais geradas

Desgaste	CASO 1		CASO 2		CASO 3	
	Tool Joint 1,5625	Tool Joint 3	Tool Joint 1,5625	Tool Joint 3	Tool Joint 1,5625	Tool Joint 3
2%	200	200	5000	5000	5000	5000
5%	200	200	5000	5000	5000	5000
10%	200	200	5000	5000	5000	5000
Total de Seções	1200		30000		30000	

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Os valores na Tabela 1 correspondem ao total entre raio interno e espessura. Para o caso 1, das 1200 seções geradas, metade correspondem a dados de espessura e a outra metade de raio interno, o mesmo corresponde aos outros casos. Logo a quantidade total de seções são 61200 seções, sendo 30600 de raio interno e 30600 de espessura. A Tabela 2 apresentada a seguir mostra os parâmetros geométricos das seções que foram geradas pelo algoritmo.

Tabela 2 - Geometria das seções geradas

Diâmetro Externo (OD)	Raio Interno	Espessura
10,75	4,578	0,797

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Além disso, na Tabela 3 a seguir apresenta os valores dos parâmetros de ruído adicionado a cada uma das seções. O ruído adicionado possui distribuição normal.

Tabela 3 - Parâmetros do ruído imposto

Parâmetros	Raio Interno	Espessura
Média	0	0
Desvio Padrão	0,0040	0,0025

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Em seções reais, as medidas de raio interno e espessura são obtidas através de fenômenos distintos, e com fontes de interferência distinta. Dessa forma, o ruído presente nos dois tipos de dados, em situação real, é certamente diferente em amplitude.

Por fim, a Tabela 4 apresenta os níveis de imperfeições geométrica imposto nas seções pertencentes ao chamado Caso 2 e do Caso 3, que possuem imperfeição de ovalização e de excentricidade respectivamente. Os níveis de imperfeição escolhido são considerados extremos quando comparado seções reais.

Tabela 4 - Imperfeição geométrica imposta

Imperfeição	CASO 1	CASO 2	CASO 3
Excentricidade	0%	0	20%
Ovalização	0%	10%	0%

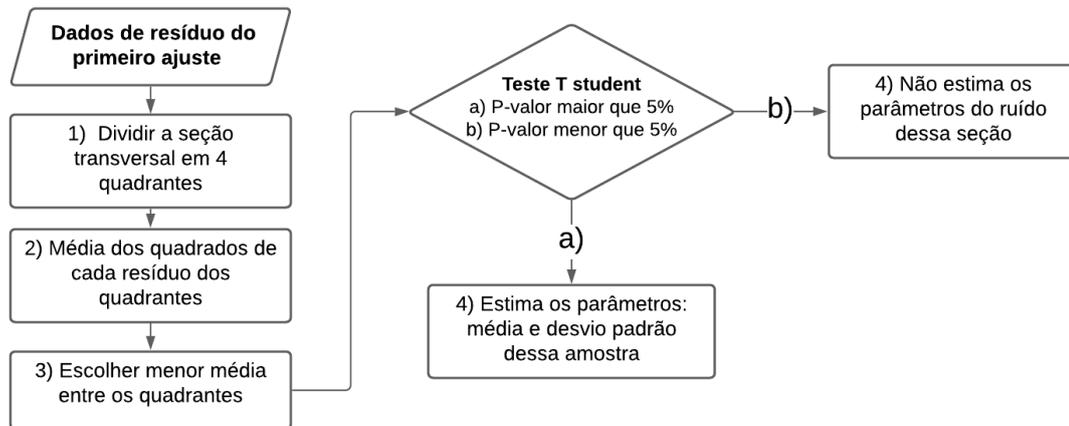
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

3.2 ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DO RUÍDO

A forma de caracterizar o ruído presente nas seções transversais investigadas é estimar sua distribuição populacional, uma vez que dessa forma é possível determinar ocorrências espúrias e aproximar o erro de medição. O erro de medição é a diferença entre o valor observado (medido) e o valor real, o resíduo, portanto, é a melhor forma de estimar esse erro, pois é a diferença entre o valor observado e o valor teórico do modelo utilizado. Para estimar os parâmetros do ruído é preciso definir bem as amostras de resíduos que serão utilizadas para estimar estes parâmetros. Cada uma das milhares de seções analisadas neste trabalho possui 90 pontos de resíduos, como há a possibilidade de muitas seções apresentarem desgaste em algum nível, utilizar todos os 90 pontos como amostras representativas do ruído nesta seção leva a um erro considerável nos parâmetros estimados para este ruído. Outra consideração a ser feita é que uma grande quantidade de amostras ajuda a determinar com maior confiança esses parâmetros. A metodologia utilizada neste trabalho efetua a divisão de cada seção em quadrantes de 22 pontos (são eliminados 2 pontos intermediários), onde é utilizado o quadrante no qual os resíduos sejam mais representativos como amostra do ruído e em seguida é calculado a média e o desvio padrão desse quadrante.

É necessário estipular critérios para escolha do quadrante mais representativo. Nesse caso, como os dados de resíduo são diferenças em relação a curva teórica, a média do conjunto de pontos tende a ser próxima de zero, no entanto, quando há presença de desgaste essa média é alterada localmente, onde os resíduos são perturbados e apresentam valores negativos ou positivos maiores. Dessa forma, o critério utilizado consiste em escolher o quadrante com a menor média dos quadrados de cada resíduo. Em adição a esse critério, o teste paramétrico t-Student para uma amostra pode ser utilizado para testar a hipótese de o conjunto de pontos do quadrante ser uma amostra extraída de uma população com média populacional igual a zero. A Figura 26 apresenta o fluxograma do processo de estimativa dos parâmetros do ruído aplicado a cada seção.

Figura 26 - Fluxograma para estimativa dos parâmetros do ruído em uma seção

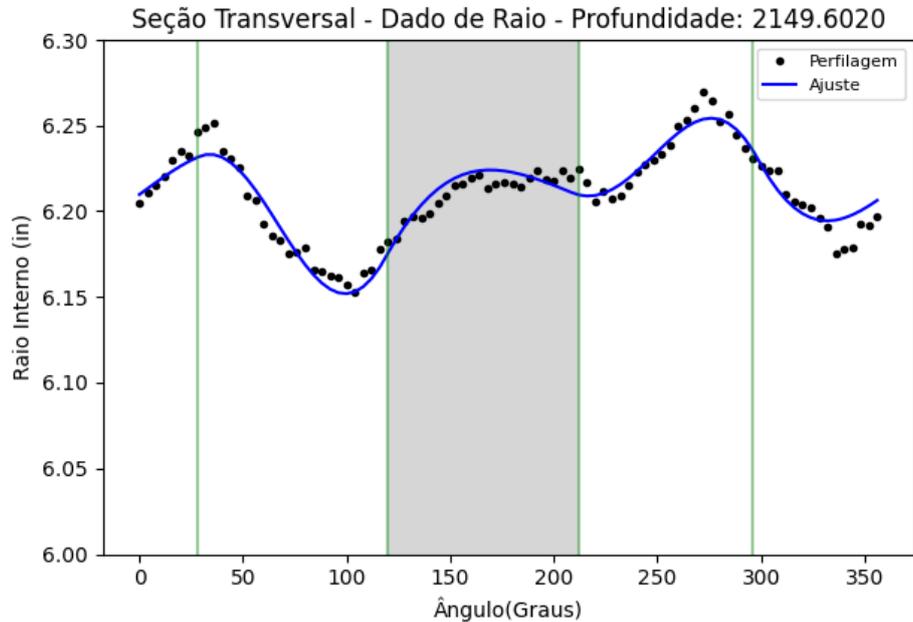


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

O teste *t-Student* para uma amostra é utilizado quando a variância da amostra é desconhecida e testa a probabilidade de a média dessa amostra ser estatisticamente diferente da média da população (para este problema a média é igual a zero). O teste pode ser utilizado de forma unicaudal ou bicaudal, a depender da hipótese que é testada. No caso desta metodologia, os valores podem estar acima e abaixo da média, e, portanto, deve-se testar a hipótese de que a média amostral seja exatamente igual a populacional, ou seja, praticando o teste *t-Student* bicaudal para uma amostra (MOORE et al, 2014).

Segundo Moore et al. (2014), para amostras com tamanho entre 15 e 40 o teste *t-Student* pode ser utilizado. Nesse caso, a suposição de normalidade para amostras desse tamanho não é um problema e o método funciona mesmo se os dados não estiverem distribuição normal pois esse tamanho de amostra é considerado suficientemente grande. Além disso, Moore et al. (2014) alerta que para amostras com tamanhos menores que 40 o resultado pode não ser preciso para amostras com alta assimetria. Esse efeito da assimetria é reduzido com a escolha da menor média dos quadrados. A Figura 27 apresenta seção real com os quadrantes separados, sendo que o quadrante destacado apresenta menor média dos quadrados, porém não é utilizado para a estimativa dos parâmetros devido a reprovação no teste *t-Student*.

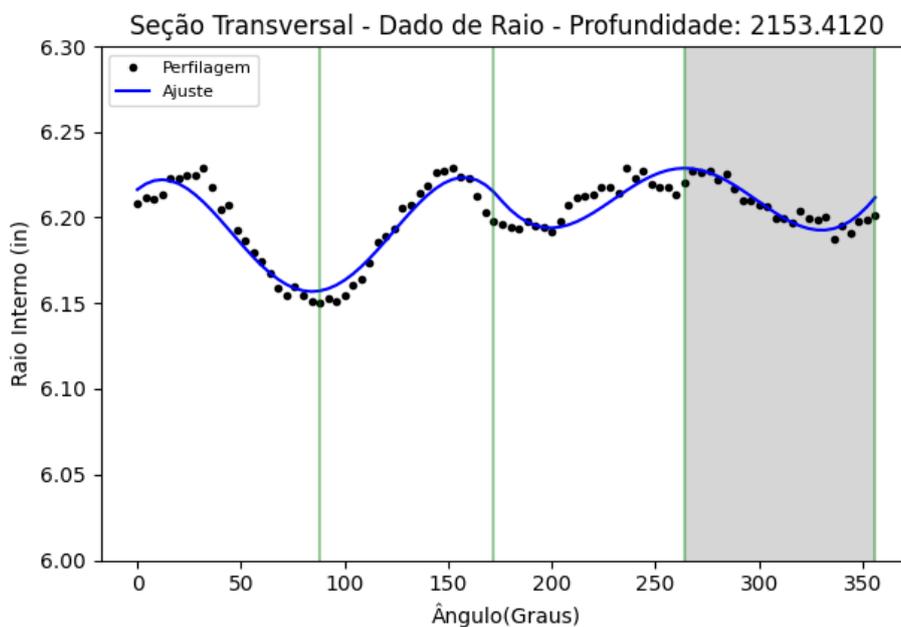
Figura 27 – Seção real com quadrante reprovado pelo teste *t-Student* em destaque



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

O teste *t-Student* possibilita filtrar seções que ainda tenham pontos possíveis de desgaste nas fronteiras do quadrante ou em casos mais extremos de seções com desgaste em maiores níveis em outros quadrantes, e que, portanto, afetam o ajuste de forma significativa resultando em valores de resíduos espúrios, como no quadrante apresentado na Figura 27, no qual apesar de representar a menor média dos quadrados os pontos encontram-se em grande maioria abaixo da curva onde os resíduos não configuram uma aproximação razoável do ruído. Para efeito comparativo, a Figura 28 apresenta uma seção com quadrante aprovado pelo teste *t-Student* em destaque sendo, portanto, um contraponto a seção apresentada na Figura 27.

Figura 28 - Seção real com quadrante aprovado pelo teste *t-Student* em destaque



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Com o cálculo da média e desvio padrão dos quadrantes em cada seção do poço, é feito a média desses parâmetros para encontrar os valores em intervalos do poço. A média é um estimador não enviesado e consistente, pois à medida que se determina a média para várias amostras aproxima-se cada vez mais dos parâmetros populacionais (PEDROSA e GAMA, 2004). Segundo Seitinger (2010), a composição dos fluidos dentro do poço varia em relação a profundidade e isso pode afetar a precisão das medidas. Dessa forma, nas seções reais é necessário dividir o poço em intervalos.

3.3 TESTES DE ADERÊNCIA

Com os parâmetros de ruído determinados propõem-se aplicar testes de aderência para avaliar as seções. Os testes de aderência possibilitam determinar se as amostras analisadas podem ser consideradas como geradas a partir de uma população com parâmetros definidos (parâmetros do ruído). Dessa forma, as seções que são aprovadas nesse teste de hipótese devem possuir distribuição semelhantes a distribuição populacional do ruído, sendo, portanto, seções cuja variação dimensional detectada é apenas devida ao processo de aquisição de dados pela perfilagem ultrassônica ou com níveis de desgaste menores a ponto de serem indistinguíveis em relação a variação causada pelo ruído do equipamento. A análise proposta utiliza os P-valores aliados a níveis de significância de 5%. Dessa forma, analisa-se as seções com base nos

P-valores determinados extraindo conclusões para melhorar a classificação das seções com maior segurança. Além do P-valor, procura-se determinar características nos dados que possam ser significativas para a classificação dessas seções.

Utilizando os tubos virtuais gerados realiza-se um estudo comparativo dos métodos comuns para teste de aderência com intuito de avaliar qual se adequa melhor ao problema proposto. As conclusões extraídas do estudo com as seções virtuais são utilizadas para o estudo de caso utilizando dados de perfilagem ultrassônica reais de um poço.

3.4 RECURSOS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS NO TRABALHO

Neste trabalho é utilizado a linguagem *Python* para implementação de todas as análises e manipulação dos dados de seções virtuais, e também de seções reais. Os pacotes *Scipy* e *Numpy*, que são pacotes para execução de rotinas de aplicação científica e de engenharia no *Python*, são amplamente utilizados nesses algoritmos. Para o ajuste da geometria elíptica teórica aos dados analisados, é utilizado uma ferramenta numérica para previsão e quantificação de desgaste que é referenciada em Gouveia et al. (2019), e que foi desenvolvida em cooperação entre a Universidade Federal de Alagoas e a Petrobrás (JONES et al, 2001).

Na análise estatística proposta, os métodos de análise podem ser encontrados nos pacotes *Scipy* (especificamente no módulo *stats*) e também no pacote *scikit-gof* que auxiliam na aplicação dos testes de aderência apresentados neste trabalho. Além disso, as bibliotecas *matplotlib* e *seaborn* do *Python* auxiliam na geração de todos os gráficos apresentados (JONES et al, 2001). Os resultados deste trabalho são alcançados utilizando Notebook com processador Core i7 – 7500U de 2.7GHz com Turbo *Boost* de até 3.5GHz e 8GB DDR4. O tempo de execução dos testes de aderência por seção (real ou virtual) é de aproximadamente $4,0 \times 10^{-3}s$, já o tempo de execução para obtenção dos parâmetros do ruído de medição por seção é de aproximadamente $16,0 \times 10^{-2}s$.

4 RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO COM SEÇÕES VIRTUAIS

Como mencionado anteriormente nesse trabalho, as análises são feitas inicialmente com os tubos virtuais, que possuem informações conhecidas, e que, portanto, possibilitam extrair resultados significativos para a metodologia aplicada posteriormente para os poços reais. Neste caso, são apresentados primeiramente os resultados da estratégia proposta para obter os parâmetros do ruído. A Tabela 5 apresenta os resultados da determinação do ruído seguindo a estratégia discutida anteriormente.

Tabela 5 - Parâmetros do ruído estimado para as seções virtuais

	CASO 1		CASO 2		CASO 3	
	Raio	Espessura	Raio	Espessura	Raio	Espessura
Média	$2,2 \times 10^{-5}$	$1,6 \times 10^{-4}$	$-2,3 \times 10^{-5}$	$-6,6 \times 10^{-5}$	$-8,6 \times 10^{-5}$	$-6,7 \times 10^{-5}$
Desvio Padrão	0,003804	0,002578	0,003794	0,002527	0,003755	0,002559
Erro no Desvio Padrão	4,90%	3,12%	5,15%	1,08%	6,13%	2,36%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Como pode ser identificado na Tabela 5, os níveis de ruído impostos nas seções virtuais, conforme apresentado na Tabela 3, foram estimados com precisão razoável. Para o parâmetro de média, todos os valores determinados são considerados exatamente iguais aos colocados nas seções virtuais. Para o desvio padrão, a precisão foi menor, ainda que, como destacado nesta Tabela 5, os erros determinados são pequenos. O ruído imposto nos dados de espessura foram melhor estimados em todos os casos, quando comparado com os parâmetros do raio. No caso dos dados de raio, o ruído apresentou erro maior no caso 3 e caso 2, com valores maiores que 5%. Tendo em vista o nível de ruído imposto maior nos dados de raio junto com o nível extremo de ovalização e excentricidade imposta em todas as seções (que afeta o ajuste), os casos 2 e 3 tornam-se, nesse contexto, situações mais extremas que resultam em um aumento no erro.

A seguir é apresentado o estudo com os três casos de tubos virtuais. Os resultados apresentados são gerados com os parâmetros conhecidos de ruído, indicados na Tabela 2, de onde procura-se determinar as estratégias para o estudo de caso com poço real. Os testes de aderência *Kolmogorov-Smirnov*, *Cramér-von Mises* e *Anderson-Darling* são comparados para identificar o método apropriado para a melhor identificação das seções.

4.1 SEÇÕES VIRTUAIS: CASO 1

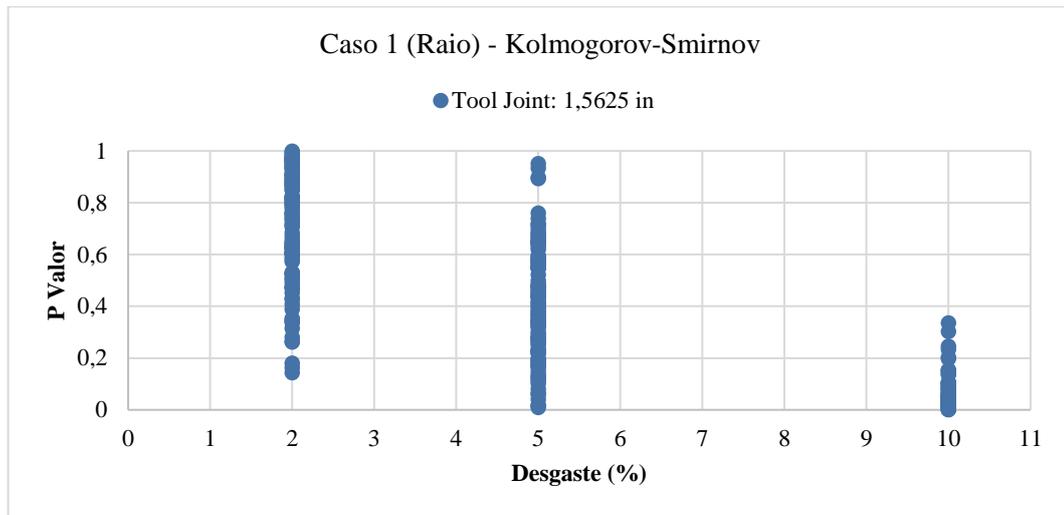
Inicialmente a análise é feita com as seções do caso 1. Todas as seções correspondem a uma idealização de seções sem imperfeições geométricas (ovalização e excentricidade). Procura-se estabelecer uma comparação do impacto das análises feitas nesse trabalho quando se aumenta os níveis dessas imperfeições, e isso é feito comparando todos os três casos.

Além disso, tendo em vista que em seções reais o desgaste pode ocorrer em níveis variados, e com geometria diferenciada de canaleta, as seções virtuais possuem três níveis de desgaste gerados pelo algoritmo, sendo que as canaletas de desgaste são feitas a partir de dois tamanhos de *tool joint*. A divisão principal considerada para o conjunto de dados presente nos três casos foi a divisão entre raio interno e espessura, visto que o ruído adicionado para as duas modalidades foi diferenciado e a comparação entre diferentes níveis de ruído é de grande interesse para a posterior análise de seções reais.

4.1.1 Caso 1 – Raio interno

Inicialmente aplicando o método de *Kolmogorov-Smirnov* (teste K-S) para os dados de resíduos de raio interno virtual, considerando primeiramente a *tool joint* de 1,5625 de raio, temos o seguinte resultado apresentado na Figura 29, que relaciona os níveis de desgaste imposto e os P-valores calculados. O P-valor, como mencionado neste trabalho, é um valor probabilístico que é comparado com o nível de significância (adotado como 5% neste trabalho) considerado no problema, afim de avaliar a hipótese nula formulada. A hipótese nula testada é se a amostra analisada possui distribuição estatisticamente correspondente a uma amostra retirada de uma população com parâmetros definidos, que para este caso são os parâmetros do ruído fornecido na Tabela 3.

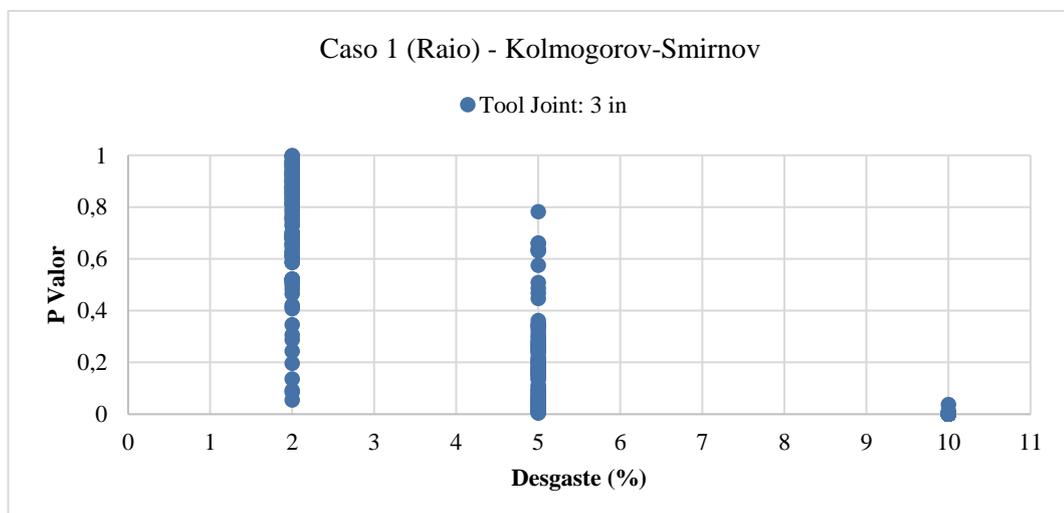
Figura 29 - Desgaste x P valor (teste K-S). Com *Tool Joint* de raio 1,5625 (Caso 1 - Raio)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 29 mostra que para as seções com desgaste maior, os P-valores são, em geral, menores que aqueles determinados para as amostras com desgaste de 2% e de 5%. No entanto, considerando o nível de significância adotado, que é 5%, a grande maioria das seções analisadas são aprovadas no teste, ou em outras palavras, como a grande maioria das seções possuem P-valor maior que o nível de significância não se pode rejeitar a hipótese dessas amostras poderem ser geradas pela distribuição populacional do ruído. Neste caso, o método de *Kolmogorov-Smirnov* não possibilitou uma diferenciação significativa em relação aos níveis de desgaste imposto. Na Figura 30 a seguir, é apresentado a mesma análise com o teste K-S, porém utilizando as seções do caso 1 que possuem *tool joint* de 3.

Figura 30 - Desgaste x P valor (teste K-S). Com *Tool Joint* de raio 3,0 (Caso 1 - Raio)

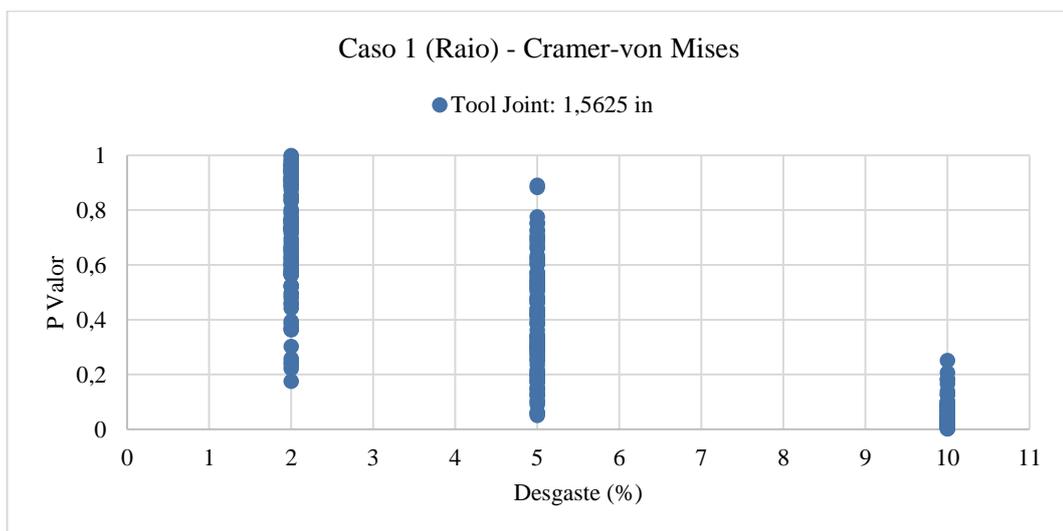


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Neste caso, é possível verificar que a grande maioria das seções com desgaste imposto de 10% apresentam valores abaixo do nível de significância, o que não ocorre na Figura 29. Nesse caso, com nível de significância de 5%, pode-se rejeitar a hipótese nula que esses dados (seções com desgaste de 10%) sejam gerados pela distribuição populacional do ruído. Para o desgaste de 5%, percebe-se que ainda é apresentado valores bastante altos de P-valor, porém, com um maior número dessas seções possuindo menores valores de P-valor em relação a Figura 29. As seções com 2% de desgaste, assim como na Figura 29, apresentam tendência de valores mais altos de P-valor. Os valores altos de P-valor indicam que as amostras testadas apresentam distribuição semelhantes ao do ruído. Nesse caso, como os dados são de resíduos, essa semelhança estatística está relacionada a maior proximidade dessas seções, com desgaste menores, das seções sem desgaste. Esse fato é esperado, pois as seções com valores menores de desgaste devem ter sua distribuição de resíduos mais semelhante a distribuição de uma seção não desgastada do que as seções com maiores níveis de desgaste.

Na Figura 31, que é apresentado a seguir, é aplicado o método de *Cramér-von Mises* (teste CVM) seguindo a mesma metodologia. É possível identificar resultados semelhantes ao obtido na Figura 29, que também representa a análise feita em seção cuja canaleta de desgaste é feita com raio da *tool joint* de 1,5625.

Figura 31 - Desgaste x P valor (teste CVM). Com *Tool Joint* de raio 1,5625 (Caso 1 - Raio)

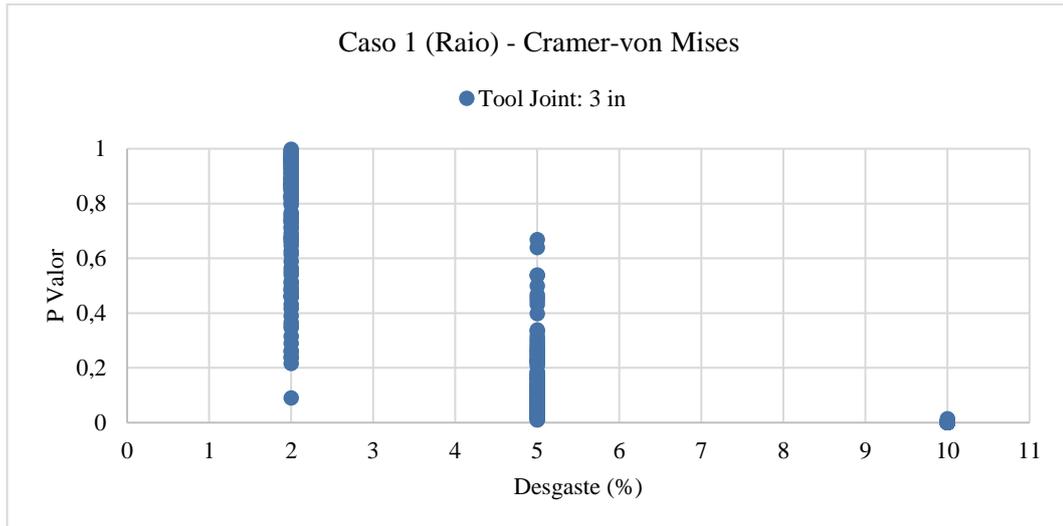


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Apesar dos resultados serem semelhantes aos obtidos no teste K-S, percebe-se que na Figura 31 o teste CVM apresenta variação menor dos P-valores em seções com desgaste maior do que a encontrada utilizando o teste K-S (Os P-valores chegavam próximos de 0,40) o que

indica melhora em relação ao teste K-S. De forma análoga, na Figura 32 é apresentado os resultados do teste CVM para as seções com canaleta de desgaste gerada por *tool joint* imposta com raio de 3. Assim como com o teste K-S, desgastes maiores impostos são reprovados facilmente quando a canaleta é imposta por uma *tool joint* maior.

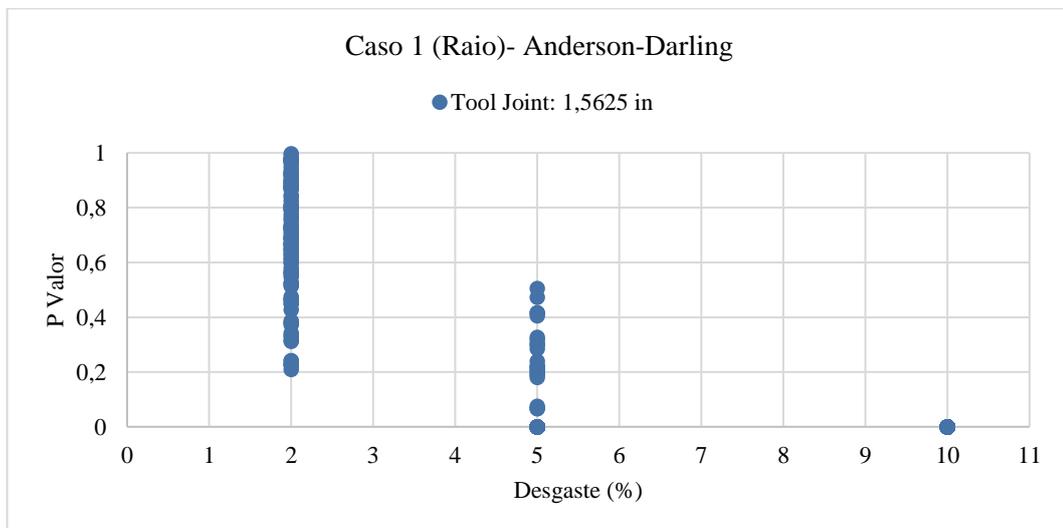
Figura 32 - Desgaste x P valor (teste CVM). Com *Tool Joint* de raio 3,0 (Caso 1 - Raio)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Utiliza-se em seguida o último teste analisado nesse trabalho: o teste de *Anderson-Darling* (teste A-D). A Figura 33 apresenta o resultado para as seções com menor *tool joint*.

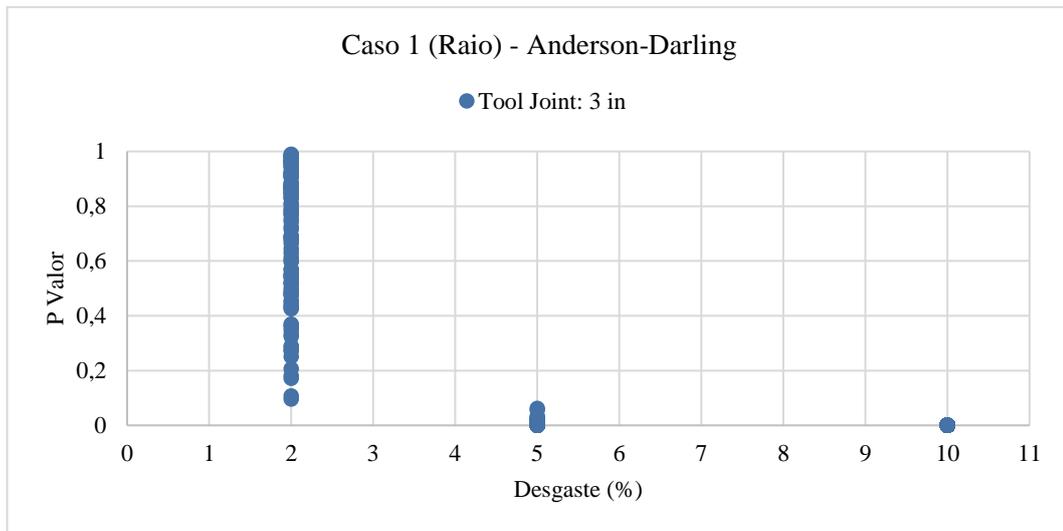
Figura 33 - Desgaste x P valor (teste A-D). Com *Tool Joint* de raio 1,5625 (Caso 1 - Raio)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Percebe-se que em relação aos demais gráficos apresentados, o teste A-D possibilitou melhor diferenciação entre os níveis de desgaste apresentado. Todas as seções com desgaste de 10% são reprovadas nos testes e as seções com desgaste intermediário possuem P-valor menor do que o encontrado em todos os demais testes, sendo que, para este caso, é possível definir uma faixa mais clara de P-valor para filtragem dessas seções com maiores desgastes. Na Figura 34, é apresentado a aplicação do mesmo teste em relação as seções com maiores *tool joints*.

Figura 34 - Desgaste x P valor (teste A-D). Com *Tool Joint* de raio 3,0 (Caso 1 - Raio)



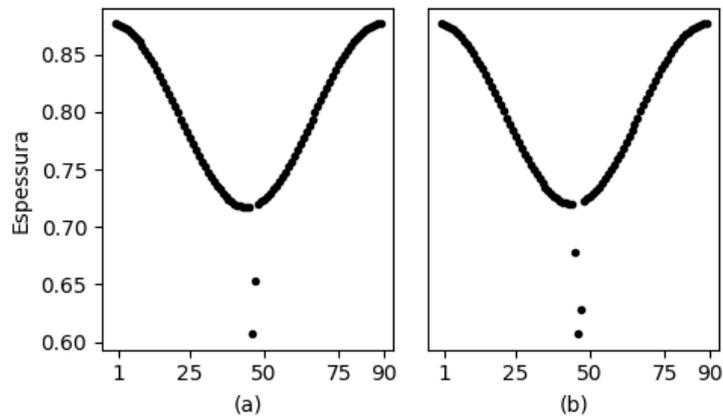
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Os resultados destacam a melhoria na diferenciação dessas seções quando comparadas com os testes anteriores. Novamente, as seções com desgaste menor apresentaram tendência de P-valores grandes, o que sugere que para o nível de ruído imposto, as seções que possuem desgaste menor de 2% podem ainda ser consideradas estatisticamente semelhantes a distribuição do ruído. O que sugere que para casos reais, certos níveis de desgaste menores podem resultar em incertezas na sua identificação.

É possível verificar, com todos os gráficos apresentados, que para seções com tamanho de *tool joint* menor a diferenciação entre os níveis de desgaste é mais difícil do que as seções com maior valor de *tool joint*. Esse fato pode ser explicado devido ao fato da geometria de ambas canaletas de desgaste serem diferentes. A profundidade de desgaste é a mesma, porém a quantidade de pontos modificados é diferente. A Figura 35 ilustra bem este fato com um exemplo de seção virtual com desgaste imposto de 25% e sem ruído, mantendo uma excentricidade de 20%, onde em (a) a seção é gerada com *tool joint* de raio de 1,5625 e em (b),

gerada com um raio de 3. É possível perceber que com um maior tamanho de *tool joint* uma maior quantidade de pontos é modificada, e com isso a diferenciação através dos testes é facilitada.

Figura 35 - Comparação entre tubos virtuais. Em (a) gerado com *tool joint* de raio 1,5625 e em (b) com *tool joint* de raio 3,0



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Tabela 6 apresenta os resultados dos três testes de aderência em relação a aprovação ou rejeição da hipótese nula. É indicado a porcentagem das seções que são aprovadas pelo teste de hipótese feito, ou seja, cujo P-valor é maior que o nível de significância escolhido. Os parâmetros de ruído testados são os valores exatos de ruído fornecidos na Tabela 5.

Tabela 6 - Comparação entre os testes de aderência. Caso 1 – Raio

Teste	P/ TJ = 1,5625	P/ TJ = 3,0
Anderson-Darling	40,33%	34,00%
Cramér-von Mises	76,67%	60,00%
Kolmogorov-Smirnov	74,67%	57,33%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Percebe-se que o teste A-D apresenta porcentagem de seções aprovadas sempre menor que as demais, o que demonstra que para o problema apresentado, este método possibilita reconhecer melhor as seções com maiores desgastes, uma vez que todas as seções presentes nesse conjunto de dados analisados possuem desgaste. A porcentagem de seções aprovadas pelo teste A-D corresponde basicamente as seções com desgaste de 2%, pois pela proporção apresentada na Tabela 1, seções com *tool joint* de 1,5625 ou de 3, com desgaste de 2% imposto, corresponde a 200 seções em um total de 600 ou, considerando a separação de raio interno e

espessura 100 seções no total de 300 (o que corresponde a porcentagem de 33,33%). Esse fato, reforça a observação que para certos níveis de ruído, desgastes menores podem apresentar uma maior dificuldade de distinção, levando a uma maior incerteza frente a avaliação das seções críticas.

4.1.2 Caso 1 – Espessura

Nessa seção analisa-se os resultados obtidos para o caso 1 com seções de menor nível de ruído imposto, conforme a Tabela 3. Da mesma forma, compara-se as seções com os dois tamanhos de *tool joint*. Na Tabela 7 é apresentado a comparação direta dos três testes, de forma análoga ao apresentado na Tabela 6, para este caso com menor ruído.

Tabela 7 - Comparação entre os testes de aderência. Caso 1 – Espessura

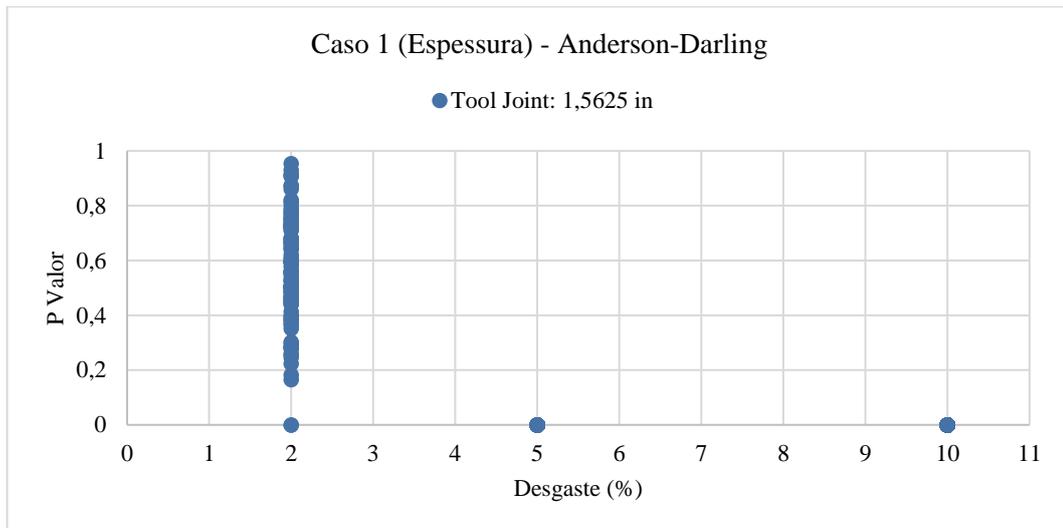
Teste	P/ TJ = 1,5625	P/ TJ = 3,0
Anderson-Darling	32,67%	33,00%
Cramér-von Mises	63,33%	42,00%
Kolmogorov-Smirnov	63,00%	38,00%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Tabela 7 mostra que na condição de menor ruído os testes tornam-se mais rigorosos na reprovação dessas seções (menos seções foram aprovadas). Nota-se também que os resultados dos três testes apresentam valores mais próximos do que aqueles apresentados na Tabela 6 que dizem respeito aos dados com maior ruído. O teste A-D ainda apresenta melhores resultados, visto que o número de seções aprovadas é menor do que os demais testes e todas as seções testadas possuem desgaste (de modo geral todas as seções deveriam ser reprovadas). Ainda se observa a tendência de as seções aprovadas serem aquelas com desgaste de 2%, como pode-se verificar com os valores mais próximo de 33,33%. Em comparação com a Tabela 6, as diferenças de porcentagens de aprovação entre os diferentes tamanhos de *tool joint* são menores na Tabela 7.

Na Figura 36, é apresentado os resultados do teste A-D para as situações de desgaste com *tool joint* menor. É possível perceber a diferença significativa nesse caso para os apresentados anteriormente. O menor ruído favorece a diferenciação entre os desgastes maiores e o desgaste menor. Em casos anteriores, para este tamanho de *tool joint*, os desgastes intermediários ainda eram aprovados em grande quantidade, como é possível perceber através dos gráficos apresentados anteriormente.

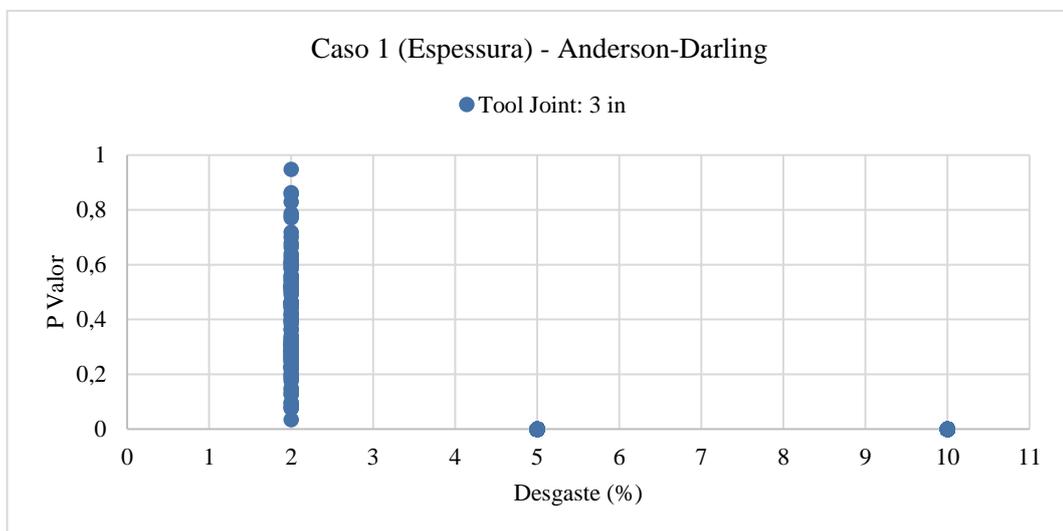
Figura 36 - Desgaste x P valor (teste A-D). Com *Tool Joint* de raio 1,5625 (Caso 1 - Espessura)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Da mesma forma, a Figura 37 apresenta o teste com as seções cujo desgaste é gerado por *tool joints* maiores. Os resultados são equivalentes. Como também é comprovado pela Tabela 7.

Figura 37 - Desgaste x P valor (teste A-D). Com *Tool Joint* de raio 3,0 (Caso 1 - Espessura)



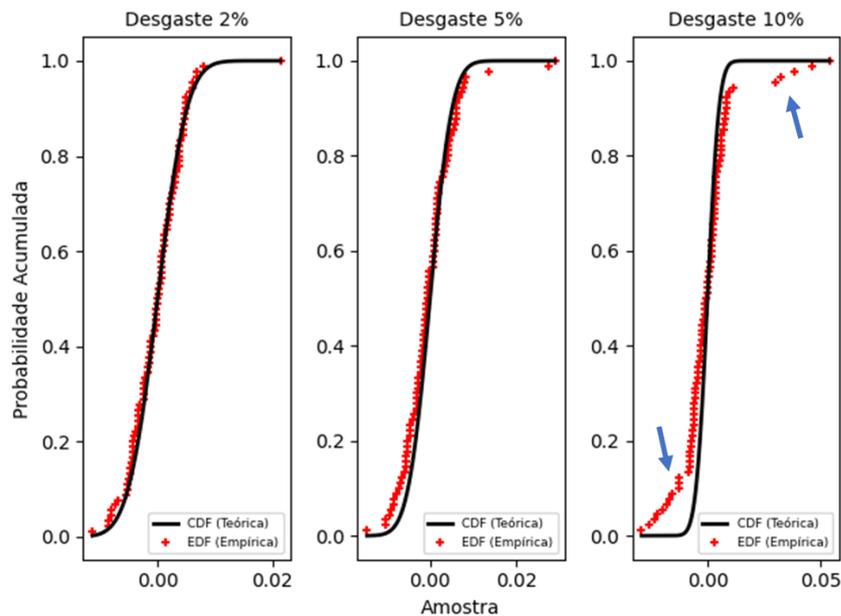
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Percebe-se que o teste A-D apresenta melhores resultados em comparação aos demais métodos. O teste K-S e teste CVM apresenta em geral resultados semelhantes entre si, porém com desempenho muito inferior ao teste A-D. Esse fato possivelmente devido a formulação do teste A-D, que adiciona sensibilidade maior quando as diferenças se encontram nas caudas da

distribuição. Como todas as seções possuem desgaste, e este é posicionado nas caudas, essa sensibilidade desempenha fator essencial para a distinção entre os dados analisados.

Como descrito anteriormente os testes de aderência apresentados são baseados em critérios de mínimas distâncias entre as EDF e CDF (distribuições empíricas e teóricas, respectivamente). A Figura 38 apresenta a CDF teórica (distribuição do ruído) e as EDFs de três seções virtuais com desgaste presentes no conjunto de dados do caso 1. Essa figura ilustra a importância de uma maior sensibilidade nas caudas para os problemas que envolvem a presença do desgaste, e, portanto, tornam o teste de Anderson-Darling mais apropriado para as análises propostas.

Figura 38 - Comparação entre EDF e CDF teórica para diferentes níveis de desgaste



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

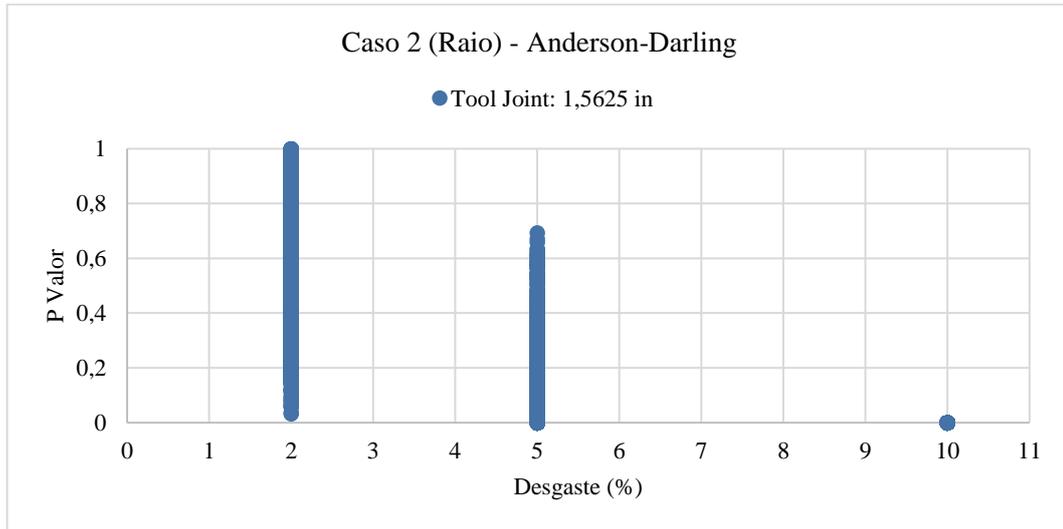
4.2 SEÇÕES VIRTUAIS: CASO 2

O caso 2 consiste no conjunto de dados com seções ovalizadas e que também possuem posição e intensidade de desgaste variável. O nível de ovalização utilizado é considerado extremo quando comparado com situações reais, o valor adicionado de ovalização encontra-se na Tabela 04. Todas as seções deste conjunto possuem o mesmo nível de ovalização imposta. Para este caso, aplica-se exclusivamente o teste A-D, que se mostrou mais apropriado para utilização nos testes de hipótese aplicados neste trabalho. Compara-se ainda os resultados para os dois tamanhos de *tool joints*.

4.2.1 Caso 2 - Raio interno

Na Figura 39, é obtido o resultado para o teste de aderência A-D com os dados relacionados ao menor valor de *tool joint*.

Figura 39 - Desgaste x P valor (teste A-D). Com *Tool Joint* de raio 1,5625 (Caso 2 - Raio)

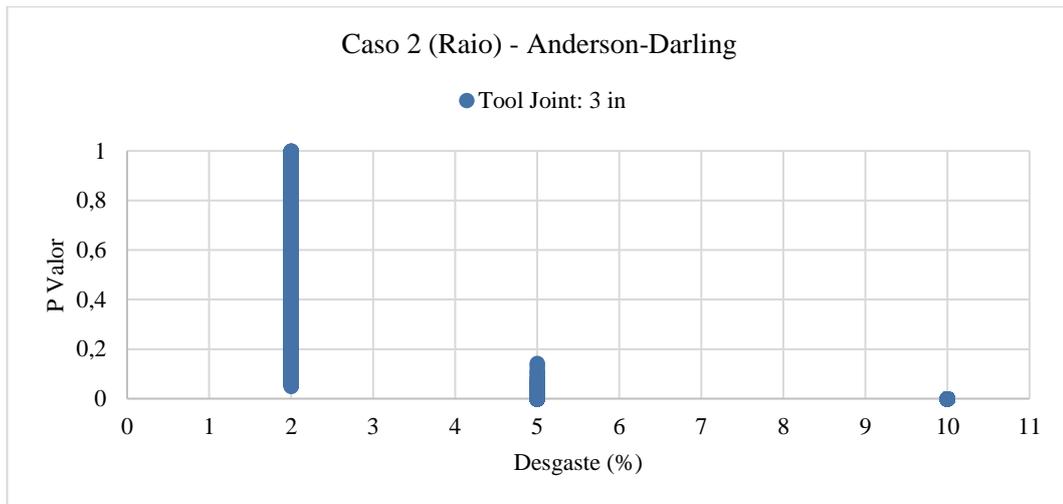


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 39, quando comparada com a Figura 33, que apresenta as mesmas condições, excetuando a imperfeição geométrica imposta, sinaliza um maior problema na diferenciação em relação aos desgastes intermediários de 5% e os desgaste de 2%, uma vez que os P-valores calculados neste exemplo apresentaram uma variação maior do que aqueles observados na Figura 33. No entanto, observa-se também que ainda é possível estabelecer um P-valor no qual a maior parte dos pontos com desgaste é eliminado, por exemplo, com um P-valor acima de 0,8 todos os desgastes maiores são eliminados, inclusive a maior parte dos pontos com desgaste de 2%, e, levando em consideração todos os testes A-D apresentados anteriormente, esta observação é válida para todos os casos testados.

Para a Figura 40, novamente observa-se a melhora na diferenciação entre os três níveis de desgaste quando se utiliza seções com desgaste provocado por uma *tool joint* maior. Além disso, comparando com os resultados obtidos para as seções íntegras em condições similares, que é apresentado na Figura 34, pode-se verificar que ambos gráficos são parecidos, a diferença é que na Figura 40 é possível identificar que há mais seções com desgaste de 5% aprovadas no teste de hipótese (seções com P-valor maior que 0,05).

Figura 40 - Desgaste x P valor (teste A-D). Com *Tool Joint* de raio 3,0 (Caso 2 - Raio)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Tabela 8 - Comparação entre os testes de aderência. Caso 2 – Raio

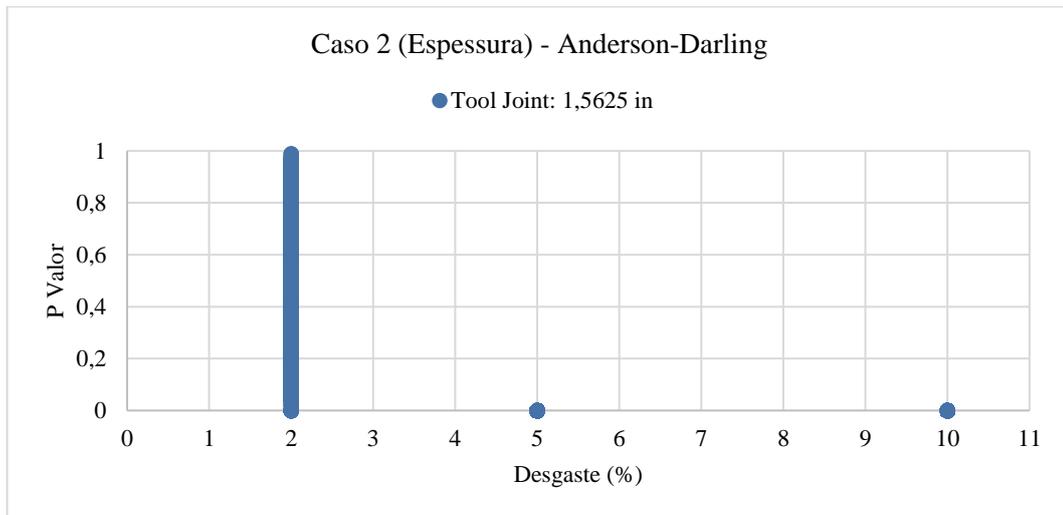
Teste	P/ TJ = 1,5625	P/ TJ = 3,0
Anderson-Darling	41,03%	33,76%
Cramér-von Mises	73,81%	62,45%
Kolmogorov-Smirnov	72,25%	61,17%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

4.2.2 Caso 2 - Espessura

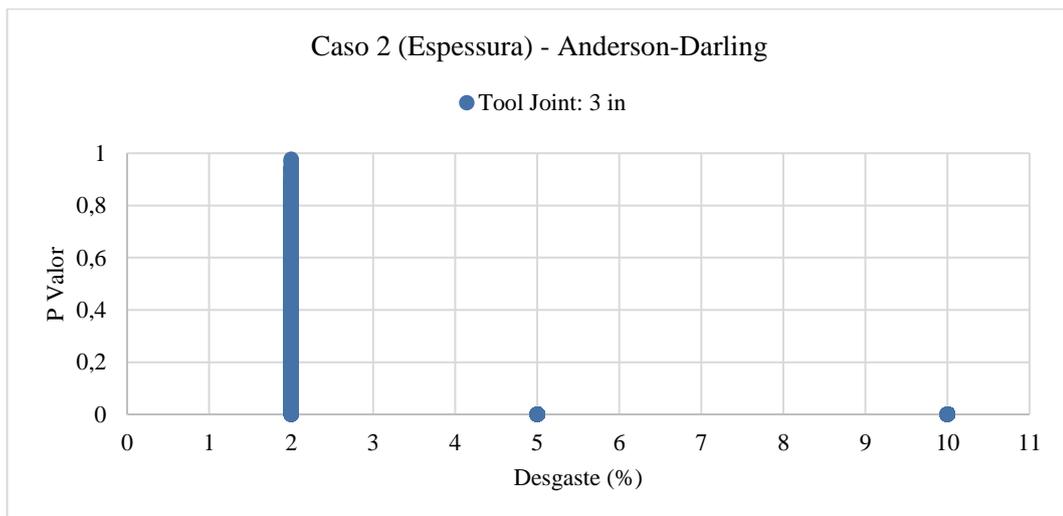
Nos testes A-D para dados de espessura com imperfeição de ovalização, encontrado nas Figura 41 e Figura 42 dadas a seguir, percebe-se que não há diferença significativa entre esses resultados e os encontrados para as seções sem imperfeições, que se encontram nas Figuras 36 e Figuras 37. Essa observação revela que para níveis de ruído menores, a imperfeição geométrica de ovalização não influenciou os resultados para ambas os valores de *tool joint*.

Figura 41 - Desgaste x P valor (teste A-D). Com *Tool Joint* de raio 1,5625 (Caso 2 - Espessura)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 42 – Desgaste x P valor (teste A-D). Com *Tool Joint* de raio 3,0 (Caso 2 - Espessura)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Tabela 9 a seguir apresenta os resultados percentuais que representam as seções aprovadas pelo teste de aderência. É apresentado as respostas de todos os testes para os dois tipos de *tool joint*. Nos resultados é possível comprovar a semelhança quando se compara a Tabela 9 com a Tabela 7.

Tabela 9 - Comparação entre os testes de aderência. Caso 2 – Espessura

Teste	P/ TJ = 1,5625	P/ TJ = 3,0
Anderson-Darling	32,95%	32,03%
Cramér-von Mises	59,45%	38,99%
Kolmogorov-Smirnov	58,64%	37,63%

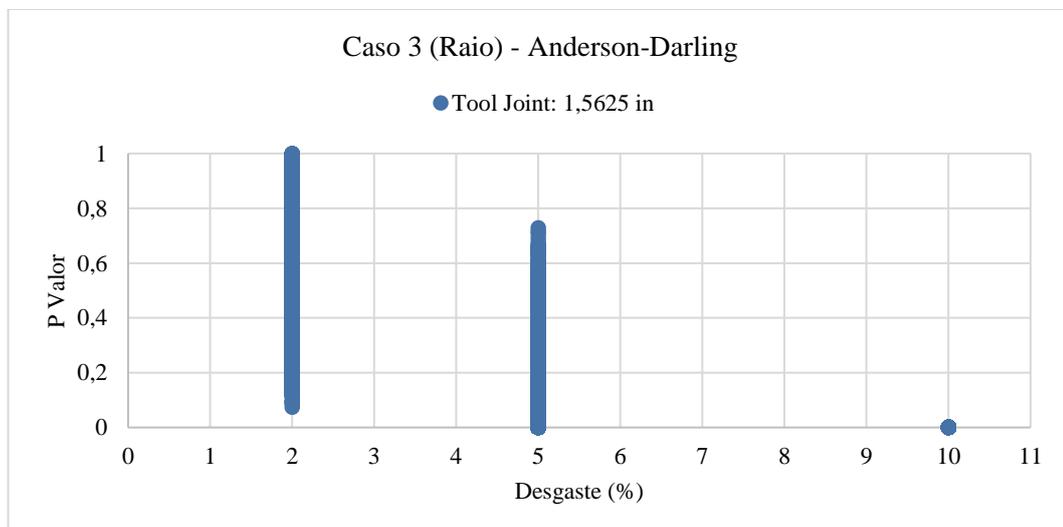
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

4.3 SEÇÕES VIRTUAIS: CASO 3

Por fim, o caso 3 consiste no conjunto de dados com seções excêntricas, o nível de excentricidade adicionado é constante para todas as seções e é apresentado na Tabela 4. Da mesma forma que os demais casos, a posição, e intensidade do desgaste foram alterados. Como também comentado no caso 2, o nível de imperfeição escolhido é considerado um valor extremo de imperfeição por excentricidade. O teste A-D também é utilizado de forma direta, devido ao fato de apresentar-se como melhor técnica para teste não paramétrico de hipótese no contexto desse trabalho.

4.3.1 Caso 3 - Raio interno

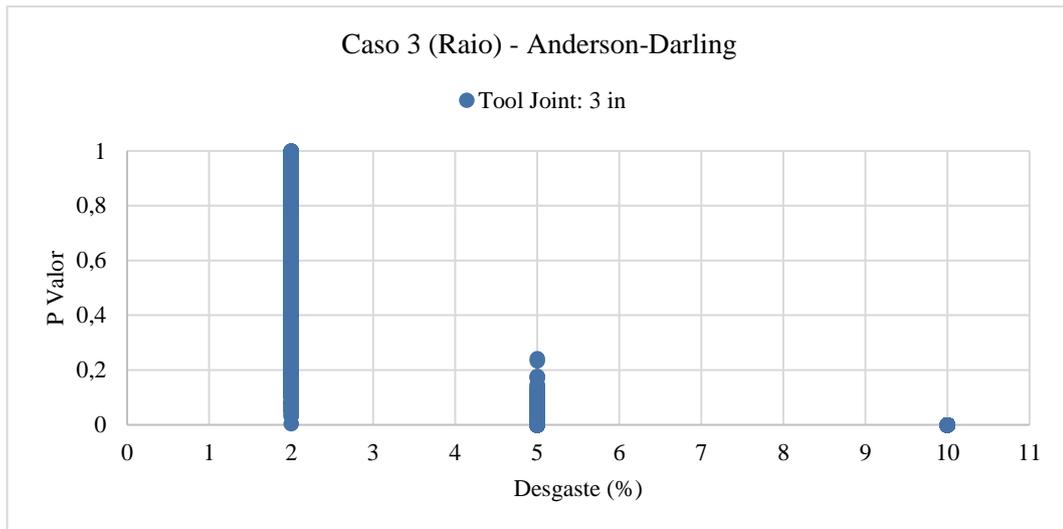
Resultados semelhantes ao encontrado na Figura 38, para seções ovalizadas, podem ser observados na Figura 43 e na Figura 44. A semelhança dos resultados são relacionadas a variação de P-valor entre as seções com desgaste maior e a semelhança na amplitude da variação de P-valor para o desgaste intermediário. Nota-se, analisando os demais casos através do teste A-D, que todas as seções com desgaste de 5% não possuem P-valor maior que 0,8.

Figura 43 - Desgaste x P valor (teste A-D). Com *Tool Joint* de raio 1,5625 (Caso 3 - Raio)

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Seguindo a tendência apresentada em todos os demais casos testados, a Figura 44 apresenta a redução da amplitude de variação para as seções com os desgastes de 5%. Os valores observados para o Figura 44 são semelhantes também aos obtidos na Figura 39, porém, os resultados de P-valores são ligeiramente maiores para as seções com desgaste de 5% do que os apresentados na Figura 40.

Figura 44 - Desgaste x P valor obtido no teste A-D com *Tool Joint* de raio 3,0 (Caso 3 - Raio)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Tabela 10 fornece os valores das seções aprovadas nos testes de hipótese com os parâmetros exatos do ruído presente nas seções de raio interno.

Tabela 10 - Comparação entre os testes de aderência. Caso 3 – Raio

Teste	P/ TJ = 1,5625	P/ TJ = 3,0
Anderson-Darling	42,4%	34,64%
Cramér-von Mises	70,33%	61,76%
Kolmogorov-Smirnov	69,67%	60,64%

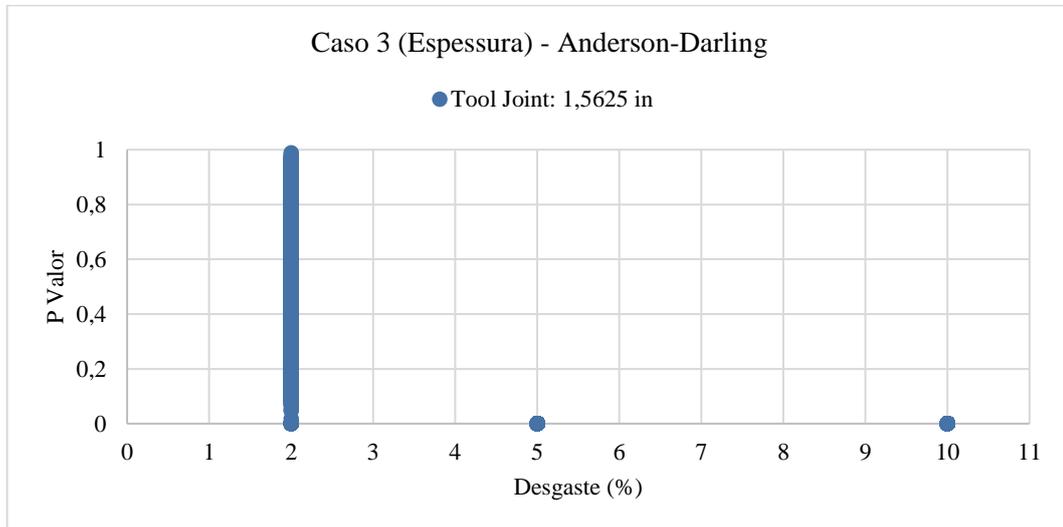
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

4.3.2 Caso 3 - Espessura

O caso 3, em geral, não apresentou diferença significativa em relação ao caso 2. Semelhanças maiores em relação ao conjunto de seções do caso 1, são alcançadas com os tipos de seções com menores ruído. Na Figura 45 e na Figura 46, apresentados abaixo, percebe-se que os resultados são equivalentes. Além disso, percebe-se a que as seções com desgaste maior são reprovadas no teste de hipótese, pois apresentam P-valor muito baixo. Os resultados

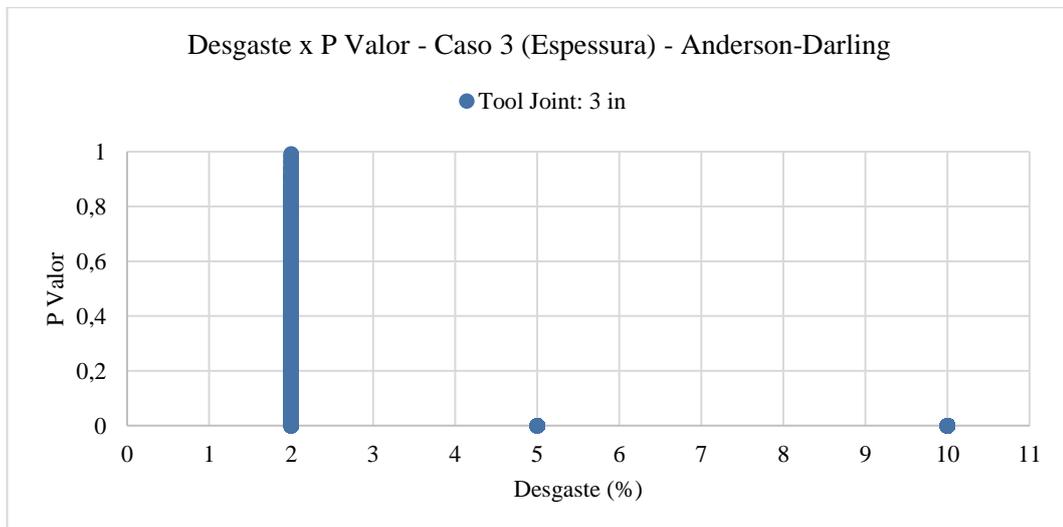
apresentados nesses gráficos são recorrentes quando se alia o teste A-D e menores níveis de ruído, como pode ser identificado nos gráficos apresentados anteriormente.

Figura 45 - Desgaste x P valor (teste A-D). Com *Tool Joint* de raio 1,5625 (Caso 3 - Espessura)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 46 - Desgaste x P valor (teste A-D). Com *Tool Joint* de raio 3,0 (Caso 3 - Espessura)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Tabela 11, resume os resultados encontrados nos gráficos acima. Percebe-se a semelhança da porcentagem de pontos aceitos no teste A-D para ambos valores de *tool joint*. Percebe-se também a discrepância dos demais testes, pois aprovam grande quantidade de seções sendo que todas as seções possuem desgaste e o nível de aprovação no teste de hipótese deveria ser o mínimo possível.

Tabela 11 - Comparação entre os testes de aderência. Caso 3 – Espessura

Teste	P/ TJ = 1,5625	P/ TJ = 3,0
Anderson-Darling	32,87%	32,09%
Cramér-von Mises	61,61%	38,45%
Kolmogorov-Smirnov	60,45%	38,20%

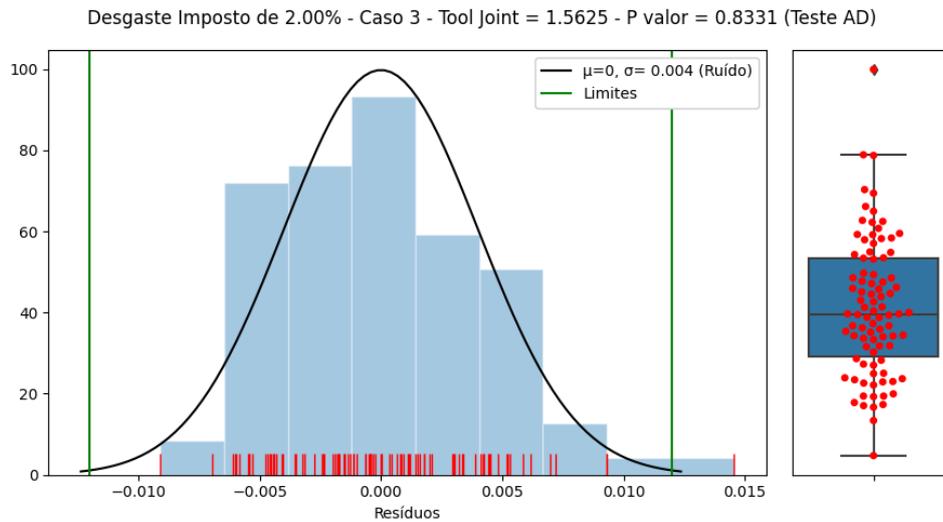
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

4.4 IDENTIFICAÇÃO DE *OUTLIERS*

Esta seção trata da identificação de valores extremos (e que não pertencem a distribuição estatística) presente no conjunto de dados virtuais de resíduo. Como é possível perceber nos casos testados, para níveis de ruídos maiores e com tamanho de *tool joint* menor é mais difícil fazer a diferenciação entre as seções com diferentes níveis de desgaste e as seções integras, seja com imperfeições ou sem imperfeições (ainda que nesse contexto os resultados para os casos 2 e caso 3 mostram-se ainda como um cenário pior). Tendo em vista que todas as seções virtuais analisadas possuem desgaste e os dados são de resíduos, onde o desgaste a ser quantificado é vinculado a esse maior resíduo, propõem-se analisar também a presença de *outliers* como forma de identificação das seções desgastadas, e nesse caso, utiliza-se a própria distribuição do ruído, através do método do Z-Score, para identificação desses *outliers*. Nesse caso, espera-se que, apesar das seções apresentarem-se como possíveis amostras estatisticamente geradas pela população do ruído (condição associada aos P-valores maiores), ainda possuam valores extremos identificáveis e que aumentam a suspeita de desgaste na seção.

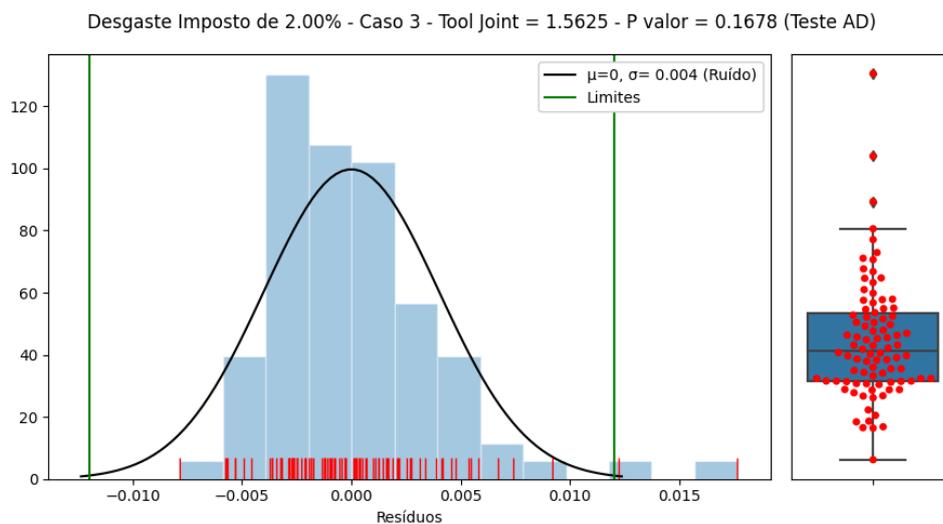
O caso analisado consiste em uma situação crítica para esta identificação: que é a análise de seções com desgastes menor (2%) onde o ruído é maior (desvio padrão de 0,004) e com *tool joint* menor (1,5625), pois a população do ruído apresenta maior dispersão, podendo nesse caso superar os valores extremos, e a *tool joint* menor, acaba por impactar menos o ajuste feito, resultando em menor diferenciação entre os níveis de desgaste. Na Figura 47 e Figura 48 são apresentados os histogramas de duas amostras de resíduo de 2% de desgaste, mas com valores extremos de P-valor. Essas imagens comparam também dois métodos de identificação de *outliers*, utilizando o Z-Score com os parâmetros do ruído e o *boxplot*, ambos definidos anteriormente nesse trabalho.

Figura 47 – Comparação entre métodos de identificação de *outliers*. P-Valor igual a 0,8331



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 48 - Comparação entre métodos de identificação de *outliers*. P-Valor igual a 0,1678

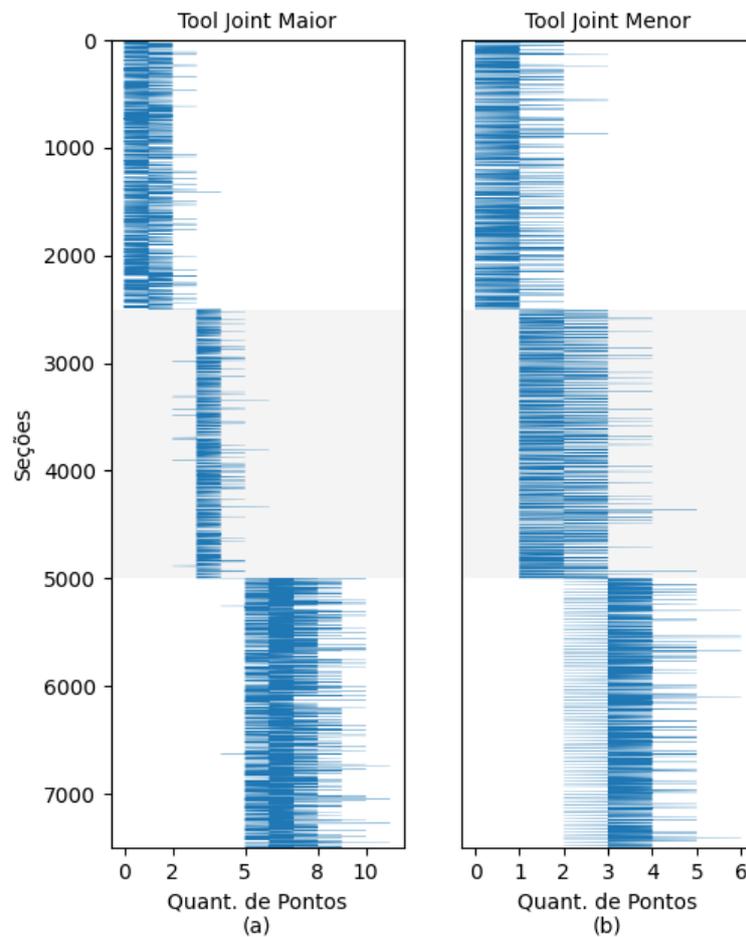


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

É possível perceber que as seções possuem valores extremos acima do limite dado pelo método do Z-Score (neste trabalho é considerado 3 desvios padrão), tanto para a Figura 47 quanto para a Figura 48, e que ao comparar com outro método de identificação de outliers percebe-se que a determinação pelo parâmetro do ruído pode ser utilizada. Pois ambas as metodologias sinalizaram a presença desses pontos extremos. Nesse caso, apesar do P-Valor alto, devido a seção apresentar ainda semelhança estatística com a distribuição do ruído, ainda foi possível identificar a presença de desgaste. Na Figura 49, apresenta-se gráfico para os demais níveis de desgaste, relacionando o número de outliers identificados e as seções

analisadas. Neste gráfico, vale ressaltar que os dados estão agrupados, onde as primeiras 2500 seções são seções com nível de desgaste menor (2%), dessa forma é possível observar a diferenciação entre os níveis de desgaste bem demarcada quando se relaciona a quantidade de outliers presentes.

Figura 49 - Comparativo entre a quantidade de outliers nas seções virtuais



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

4.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE DAS SEÇÕES VIRTUAIS

Nesta seção são pontuadas as principais observações encontradas na análise dos três casos estudados, que consistiam em um conjunto de milhares de pontos de resíduos obtidos com seções virtuais com posição e níveis de desgaste variado, ruído e imperfeições geométricas:

- O ruído no equipamento pode ser estimado de forma simples. Este fato foi validado com os conjuntos de seções virtuais analisadas neste trabalho;
- O teste de *Anderson-Darling* provou-se mais apropriado para a identificação de seções

utilizando os testes de aderência;

- É possível diferenciar o desgaste pelo P-valor e que essa diferenciação é mais simples quando o ruído do equipamento é maior;
- Valores de *tool joint* maiores geram canaletas maiores, e, portanto, maior quantidade de pontos são alterados, facilitando a diferenciação entre desgaste e ruído;
- As seções aprovadas no teste de hipótese, mas que possuem desgaste, possuem também *outliers*;

5 ESTUDO DE CASO

Foi proposto neste trabalho o estudo de caso utilizando os dados de perfilagem de um poço. Neste estudo, propõe-se colocar em prática as conclusões extraídas com as seções virtuais. O poço apresentado trata-se de um conjunto de seções transversais obtidas diretamente da perfilagem ultrassônica, consistindo em uma fase da coluna de revestimento com intervalo de profundidade de 2149,14 m até 2817,72 m. A Tabela 12 apresenta os parâmetros nominais principais relacionados à geometria dos tubos.

Tabela 12 – Parâmetros geométricos nominais dos tubulares

Medidas Nominais	
OD	13,375 in
Espessura	0,517 in

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Na Tabela 13 são apresentados os parâmetros da perfilagem ultrassônica executada. A amostragem radial diz respeito ao espaçamento angular entre os pontos medidos. A amostragem vertical, corresponde ao intervalo de medição ao longo da profundidade do poço. Estas informações são equivalentes entre os dados de raio interno e espessura.

Tabela 13 - Parâmetros relacionados a perfilagem

Perfilagem	
Amostragem Radial	4°
Amostragem Vertical	6 in
Total de Seções	4201

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Aplica-se a metodologia, discutida com as seções virtuais, para estimar os parâmetros do ruído no poço estudado. A Tabela 14 apresenta os resultados encontrados nesta análise considerando como intervalo o poço completo, como foi feito com os tubos virtuais.

Tabela 14 - Parâmetros do ruído estimado para todo o poço

Parâmetros	Raio Interno	Espessura
Média	$3,77 \times 10^{-5}$	$8,95 \times 10^{-6}$
Desvio Padrão	0,005279	0,003577

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Tendo em vista a possibilidade de a precisão do equipamento ser afetada ao longo do

poço, a Tabela 15 apresenta os resultados do ruído estimado a cada 15 m aproximadamente.

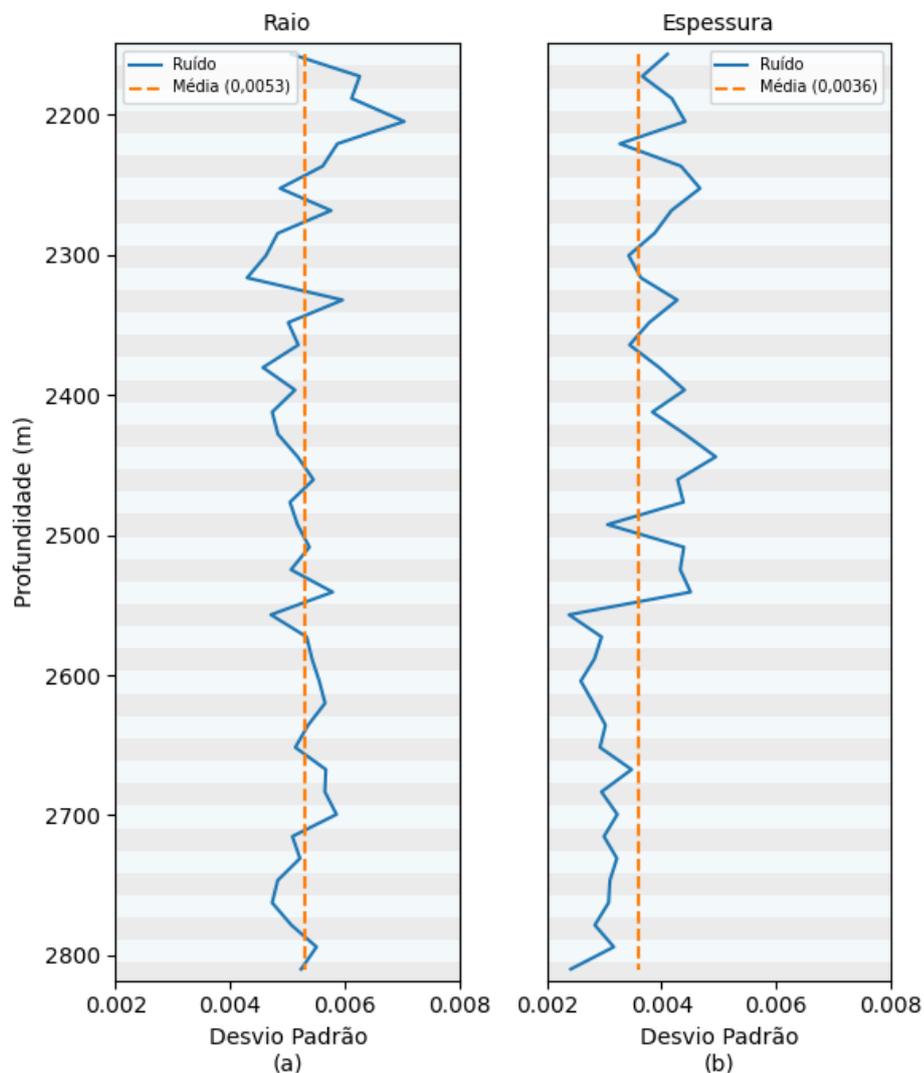
Tabela 15 - Parâmetros do ruído em vários intervalos do poço analisado

Intervalo	Raio Interno		Espessura	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
01	8,14E-05	0,005061	-2,04E-04	0,004103
02	5,27E-04	0,006254	-1,12E-04	0,003665
03	7,01E-05	0,006114	-1,53E-04	0,004179
04	4,53E-05	0,00703	-5,76E-04	0,004412
05	3,50E-04	0,005866	-6,04E-06	0,003273
06	3,58E-04	0,00561	6,19E-06	0,004339
07	-9,32E-05	0,004866	8,11E-05	0,004670
08	2,82E-05	0,005755	-1,67E-04	0,004171
09	1,62E-05	0,004825	-4,08E-05	0,003877
10	-1,90E-04	0,004622	-1,19E-04	0,003426
11	3,26E-05	0,004293	1,01E-05	0,003641
12	-2,75E-04	0,005957	-7,05E-04	0,004273
13	-2,01E-04	0,005009	1,52E-04	0,003785
14	1,69E-04	0,005185	-2,48E-05	0,003443
15	-2,29E-04	0,004569	-6,98E-05	0,003959
16	-4,33E-06	0,005127	3,53E-05	0,004401
17	-1,15E-04	0,00473	-1,15E-04	0,003840
18	-3,30E-04	0,00483	1,22E-04	0,004407
19	-2,01E-05	0,005174	4,23E-04	0,004944
20	-1,90E-04	0,005448	4,46E-05	0,004280
21	-4,23E-05	0,00504	2,55E-04	0,004381
22	-3,72E-04	0,005171	1,96E-04	0,003058
23	2,04E-04	0,005378	5,30E-05	0,004388
24	1,28E-04	0,005057	3,66E-04	0,004326
25	4,48E-04	0,005783	2,01E-04	0,004506
26	1,81E-04	0,004708	-2,14E-05	0,002388
27	1,38E-04	0,00533	-2,69E-05	0,002955
28	4,85E-05	0,005424	4,76E-05	0,002830
29	9,90E-05	0,005549	1,14E-04	0,002593
30	1,95E-04	0,005651	7,33E-05	0,002813
31	2,39E-04	0,005355	7,03E-05	0,003023
32	1,16E-04	0,005133	-7,46E-05	0,002928
33	-4,46E-05	0,005665	1,80E-06	0,003478
34	6,98E-05	0,005648	-5,14E-06	0,002953
35	-7,91E-05	0,00585	-7,49E-06	0,003229
36	1,09E-04	0,005082	1,98E-05	0,002997
37	1,10E-04	0,005214	4,00E-06	0,003222
38	6,71E-05	0,004825	-1,90E-05	0,003100
39	1,23E-04	0,004729	-3,02E-06	0,003077
40	-3,55E-05	0,005064	2,08E-04	0,002838
41	-6,19E-06	0,005502	1,65E-04	0,003168
42	3,87E-06	0,005235	8,93E-06	0,002419

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 50 apresenta os dados da Tabela 15 de forma gráfica, incluindo a comparação com o valor médio do ruído para todo o poço (Tabela 14). É possível perceber que os dados de espessura possuem menor nível de ruído (uma vez que a distribuição possui desvio padrão menor, quando comparado com a do raio interno) esse fato observado era esperado uma vez que as medidas de espessura são tomadas através da ressonância das ondas ultrassônicas na parede do tubular, sendo considerada na literatura técnica como uma medida com maior nível de precisão (Seitinger, 2010).

Figura 50 - Variação do desvio padrão do ruído ao longo do poço



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

As variações aleatórias que são detectadas nos dois perfis podem estar relacionadas às condições que afetam as medições dentro do poço, pois, como mencionado anteriormente, a presença de fluidos com condições de homogeneidade variável pode afetar a precisão das

medidas em instrumentos ultrassônicos (SEITINGER, 2010). Pode-se perceber ainda que na Figura 49, os perfis (a) e (b) apresentam, em muitas regiões, picos em concordância, e além disso, nota-se que nos intervalos de maior profundidade a variação aleatória dos dados é reduzida, perceptível em ambos perfis, ainda que em um nível maior para os dados de espessura, o que pode indicar uma modificação significativa no processo de medição com o equipamento, uma vez que é um comportamento capturado em ambas formas de medição. Dessa forma, é perceptível que para a análise ser mais representativa, é mais apropriado determinar os parâmetros dos dados reais em intervalos. Neste trabalho, utilizam-se todos os parâmetros apresentados na Tabela 15 para a análise em cada um dos 42 intervalos.

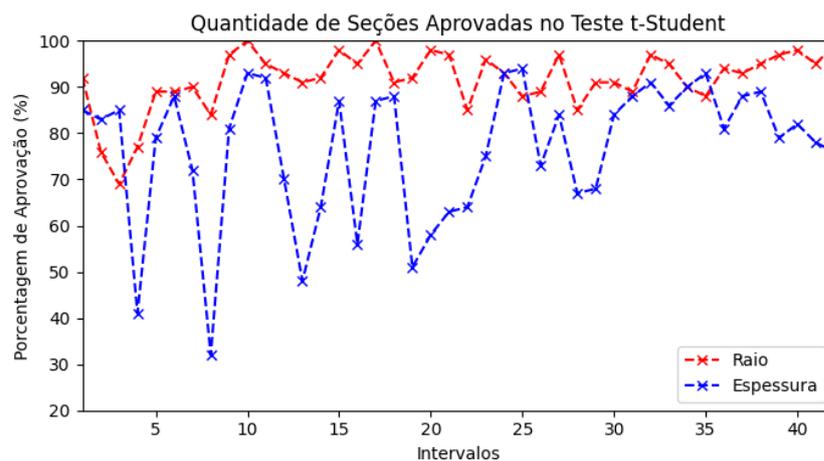
Na Tabela 16 são apresentadas as quantidades de quadrantes utilizados para estimar os parâmetros do ruído (amostras filtradas pelo teste *t-Student*). Além disso, a Figura 51 apresenta os resultados discretizados para cada um dos intervalos analisados.

Tabela 16 - Quantidade de quadrantes aprovados no teste *t-Student*

Critério de Aprovação	Raio Interno	Espessura
<i>t-Student</i>	91,67%	76,79%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 51 - Comparação entre a quantidade de quadrante aprovados no teste *t-Student*



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

É possível perceber a grande quantidade de amostras que são aprovadas no poço, mostrando bons resultados em relação às suposições iniciais para o ruído, uma vez que a aprovação dos quadrantes indica que são amostras geradas por uma população com média

populacional igual a zero. É possível perceber que, em dados de espessura, apesar da grande maioria das seções serem aprovadas em cada intervalo, existe uma maior variabilidade e intervalos com uma taxa de aprovação menor quando comparados com os dados de raio interno. Esse fato pode indicar maior deficiência em relação ao ajuste feito com a elipse distorcida, transladada e rotacionada. Vale ressaltar que os dados de espessura podem capturar possíveis danos externos também, o que torna mais difícil a tarefa do ajuste, dessa forma, o resultado da Figura 51 sugere que o ajuste aos dados de espessura, principalmente nos primeiros intervalos, não possui a mesma qualidade que aquele alcançado com os dados de raio interno.

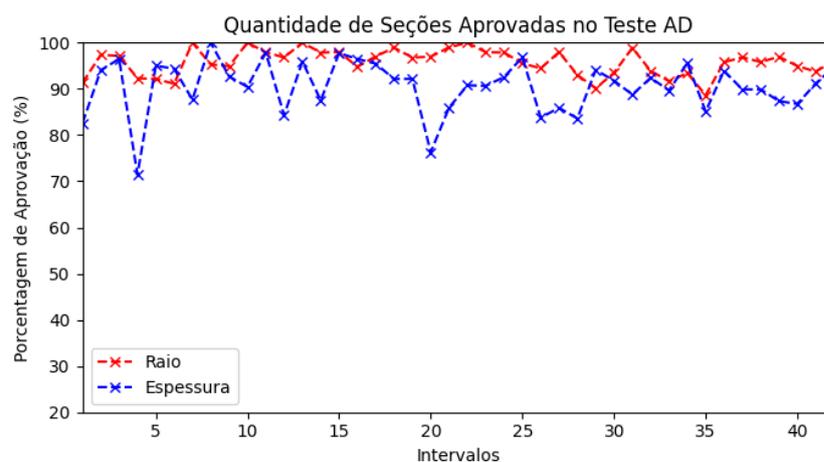
Os parâmetros estimados utilizando todas as seções aprovadas (através da média dos parâmetros de cada quadrante) podem ser utilizados no teste de aderência A-D. Neste caso, testa-se a hipótese nula das amostras aprovadas pertencerem estatisticamente a uma população de distribuição normal e cujos parâmetros populacionais são os estimados. A Tabela 17 e a Figura 52 apresentam os resultados desse teste.

Tabela 17 - Porcentagem de aprovação no teste A-D usando os quadrantes aprovados pelo *t-Student*

Critério de Aprovação	Raio Interno	Espessura
Anderson-Darling	96,68%	91,66%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 52 - Comparação entre a quantidade de amostras do ruído aprovado no teste A-D



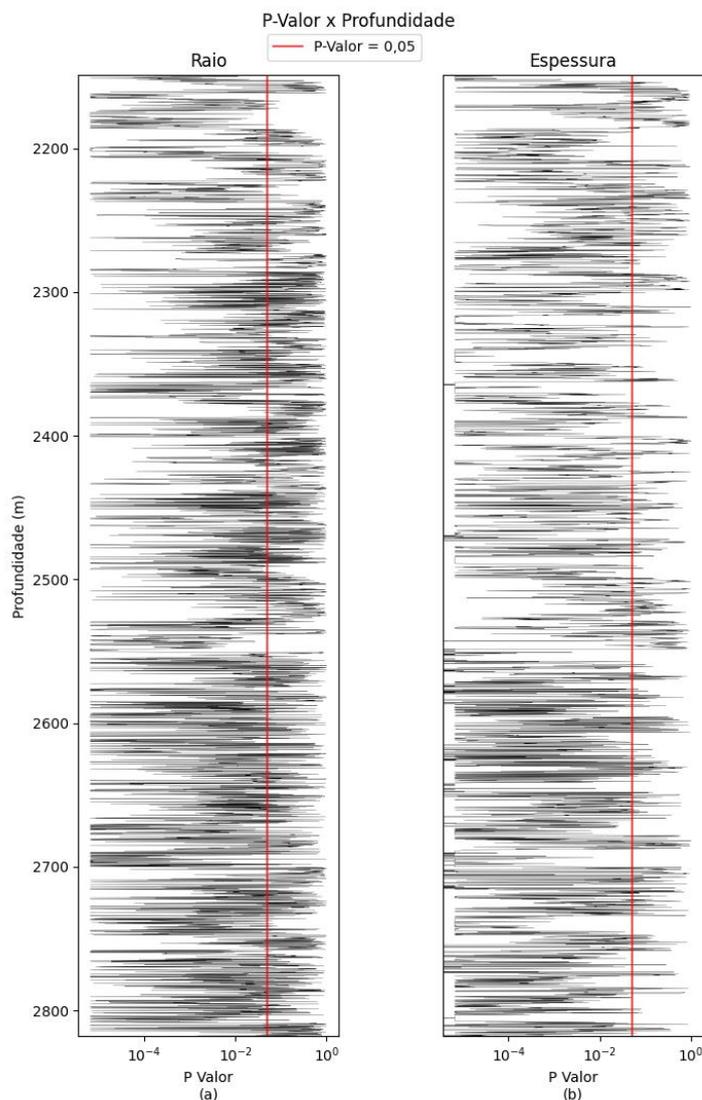
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

O teste A-D confirma de forma mais contundente que o ruído presente nas seções seguem uma distribuição normal, com média zero e, levando em conta a grande quantidade de

seções aprovadas no teste A-D (já utilizando de início uma grande quantidade de amostras filtradas pelo teste *t-Student*, como apresentado na Figura 51) percebe-se que os parâmetros estimados representam grande parte das amostras, pois em cada intervalo testado, com os parâmetros da Tabela 15, a aprovação das seções superou 70% seja para dados de espessura ou raio interno.

Com os parâmetros apresentados na Tabela 15, o teste A-D pode ser utilizado para todas 4201 amostras de 90 pontos de resíduos. A Figura 53 a seguir apresenta esse resultado em relação aos dois tipos de dados.

Figura 53 - Comparação P-valor ao longo do poço



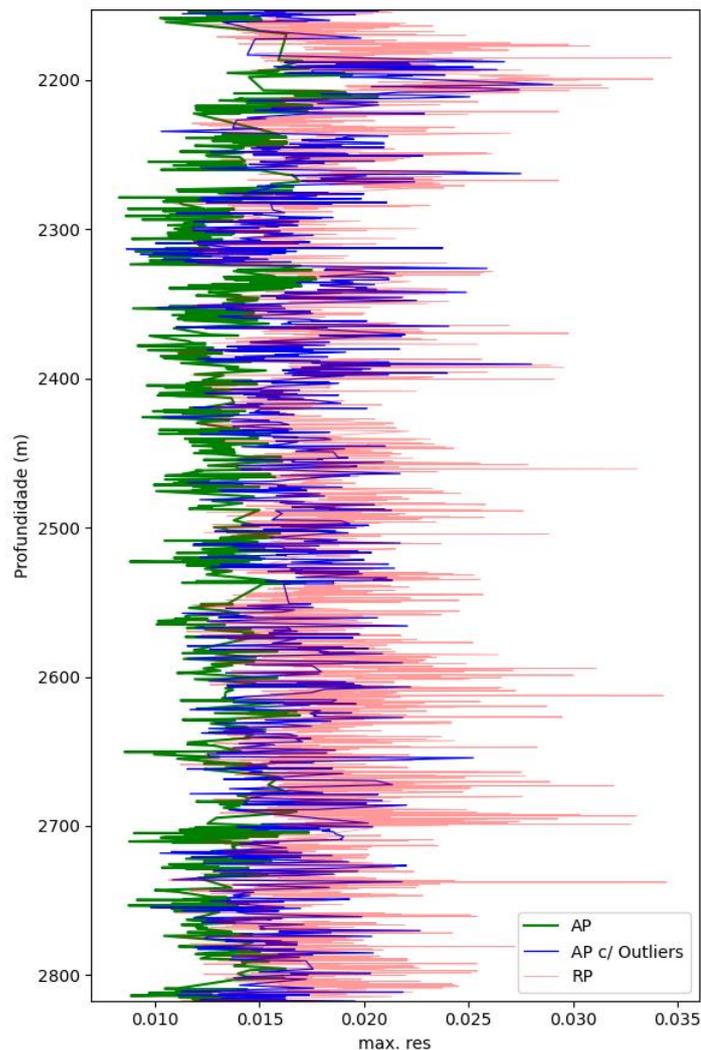
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Para melhorar a compreensão dos resultados dispostos de forma gráfica, o eixo dos P-valores encontra-se em escala logarítmica. Percebe-se inicialmente em (a) que existe maior

concentração de seções com P-valores maiores que 0,05 (nível de significância do problema) quando comparado com o perfil em (b). Levando em conta o estudo comparativo com as seções virtuais, o ruído em menor nível possibilita diferenciar melhor as seções com dano por desgaste, e dessa forma, os dados de espessura seriam mais aptos a essa tarefa. No entanto, em casos reais, deve-se levar em conta também que a espessura pode capturar informação da superfície externa e dessa forma, o ajuste pode ser mais afetado e os perfis podem apresentar diferenças maiores.

Utilizando a metodologia aplicada nos tubos virtuais, e levando em conta que o máximo resíduo positivo do conjunto de dados é relacionado ao desgaste, a Figura 54 apresenta a divisão, em três perfis, dos dados de raio interno do poço baseado nos resultados do teste de aderência.

Figura 54 - Classificação do conjunto de dados de resíduos do poço (dados de raio interno)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Na Figura 54, o perfil AP representa os pontos do poço onde estatisticamente as variações dimensionais observadas podem ter sido geradas pelo próprio ruído do equipamento, sendo, portanto, as seções mais bem comportadas dentro do conjunto de dados analisados. Percebe-se que no perfil *AP c/ outliers*, mesmo com as seções aprovadas no teste A-D, ainda há presença de *outliers* que indicam desgaste, pois são pontos que não pertencem à distribuição populacional do ruído estimado. No perfil RP, nota-se que os menores P-valores estão relacionados as seções com grande variabilidade e valores extremos de máximo resíduo (maiores desgastes).

O perfil AP da Figura 54 mostra que as seções íntegras estão presentes em menor quantidade quando comparado com o perfil de seções reprovadas. Do início do poço até 2200 m e de 2550 m até 2700 m a concentração de seções aprovadas é menor do que no restante do poço, ao mesmo tempo a concentração de seções reprovadas é maior nesses intervalos (perfil RP), sendo possível perceber também a concentração de picos de máximo resíduo nesses intervalos. A Tabela 18 apresenta a relação quantitativa entre os perfis apresentados na Figura 54 mostrando a grande quantidade de seções reprovadas.

Tabela 18 - Quantidade de seções para cada classificação baseada no P-Valor (Raio)

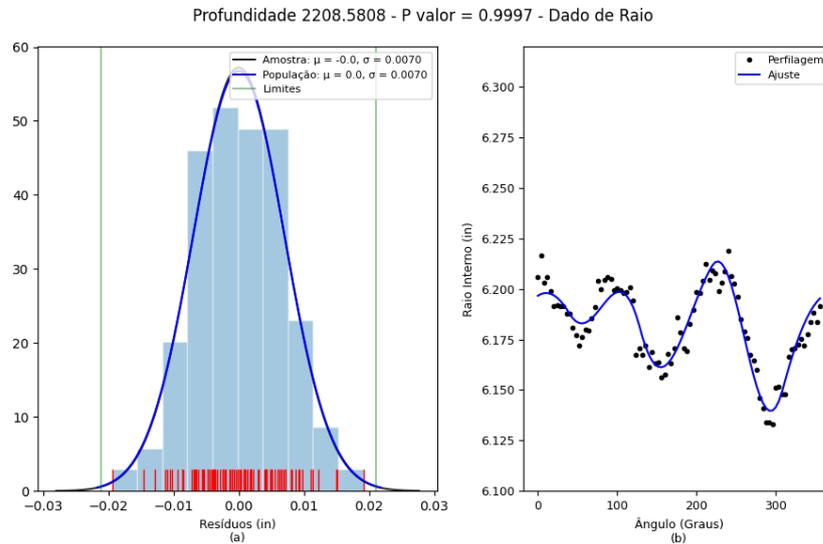
Classificação	Porcentagem
AP	22,11%
AP c/ <i>outliers</i>	22,45%
RP	55,44%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 55 apresenta a seção transversal e o correspondente histograma de resíduos relacionado ao maior P-valor dentro do conjunto de seções aprovadas sem *outliers* apresentado na Figura 54 (perfil AP). Observa-se que a curva se ajusta bem aos dados e que os pontos da perfilagem apresentam variação aleatória aparente que é condizente com o processo de medição. O maior resíduo presente nessa seção consiste em um ponto situado em uma região de valores incomuns da distribuição normal (entre 2 a 3 desvios padrão), porém ainda consistente com a distribuição estimada. A seção analisada situa-se em uma região com os maiores níveis de ruído, como pode ser comparado nas informações da Figura 55 e no perfil apresentado na Figura 50. Dessa forma, os níveis de ruído podem gerar incertezas maiores na identificação apropriada de danos mais significativos para as seções desse intervalo, como pontuado nos resultados com as seções virtuais. No caso específico da seção apresentada na

Figura 55, a tomada de decisão sobre a presença de desgaste pode ser feita mediante a aceitação de critérios mais rígidos (presença de pontos na região acima de 2,5 desvios padrão ou análise da seção transversal).

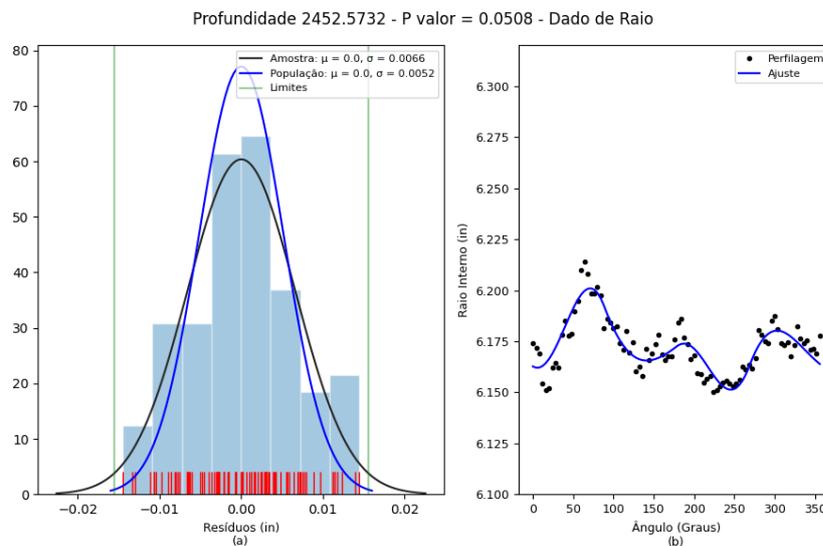
Figura 55 - Maior P-valor no conjunto de seções aprovadas sem *outliers* (Raio)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Na Figura 56, a seção transversal e o histograma de resíduos são relacionados ao menor P-valor do conjunto de pontos do perfil AP da Figura 54. Essa seção pertence à região com um nível de ruído menor (população do ruído com menor desvio padrão) e, portanto, tendo em vista a grande dispersão, o baixo P-valor situa essa seção no limiar entre reprovação e aprovação.

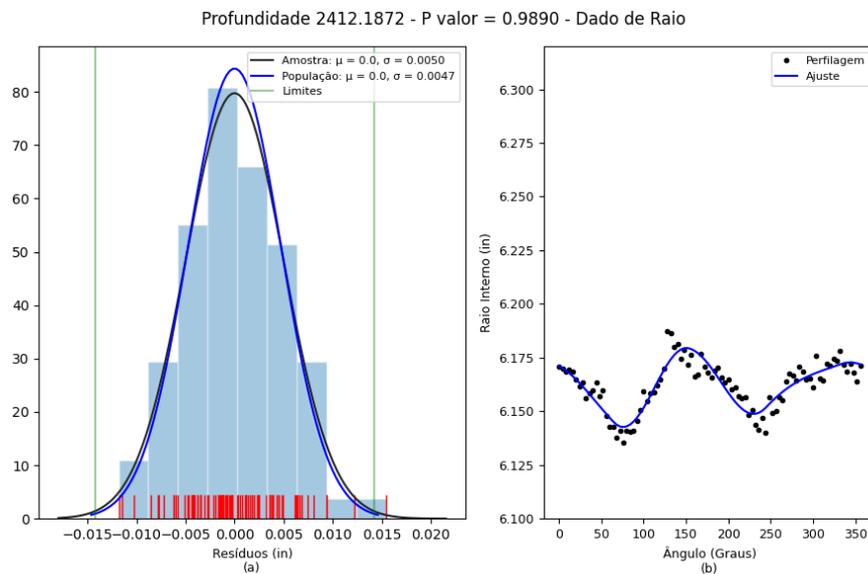
Figura 56 - Menor P-valor no conjunto de seções aprovadas sem *outliers* (Raio)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 56 possui um padrão de resíduos mais complexo, e sugere uma seção transversal com um nível de ruído de medição mais extremo em relação ao intervalo no qual esta seção se encontra. O histograma apresentado indica a presença de vários pontos perto do limite de *outliers*, o que representa uma maior dispersão dos resíduos ao longo da cobertura radial da seção e não em uma região específica. Essa seção mostra que a região da fronteira entre a aprovação e reprovação é de difícil classificação, principalmente em relação as seções reais. A Figura 57 apresenta a seção com maior P-valor no conjunto de dados do perfil de seções aprovadas com a presença de *outliers* na Figura 54.

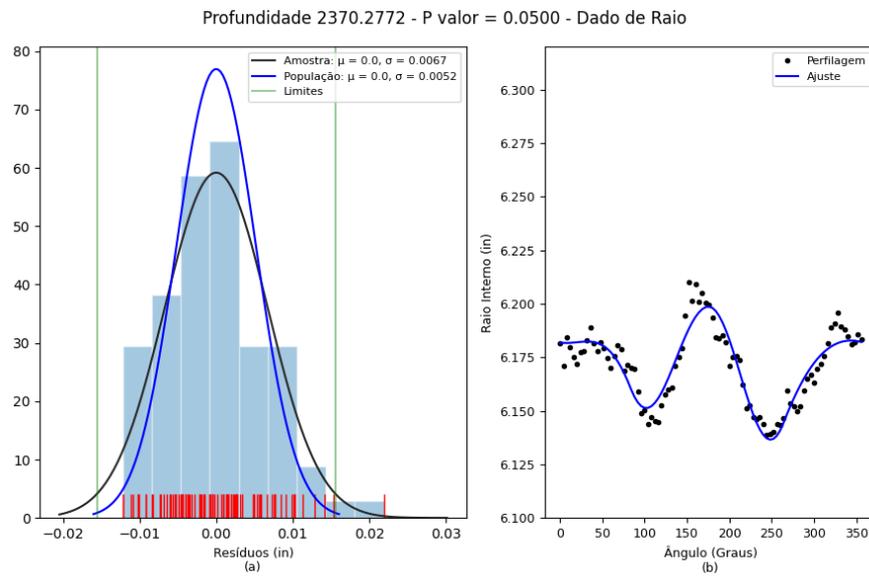
Figura 57 - Maior P-valor no conjunto de seções aprovadas com *outliers* (Raio)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Na Figura 57, é possível verificar que a seção transversal é bem comportada e com padrão de resíduos do ajuste seguindo uma distribuição próxima do que se espera de resíduos devido apenas ao ruído do equipamento, sendo, portanto, uma seção transversal análoga à apresentada na Figura 55. No entanto, possui *outliers* que são relacionados a um desgaste localizado entre 100° e 150° . Seções com P-valor muito alto aliados à concentração de pontos na cauda da distribuição normal dos resíduos podem sinalizar seções com a presença de desgastes em nível menor e com uma região mais bem definida. A Figura 58 apresenta a seção com menor P-valor dentro do perfil de seções aprovadas com *outliers* (da Figura 54).

Figura 58 - Menor P-valor no conjunto de seções aprovadas com *outliers* (Raio)

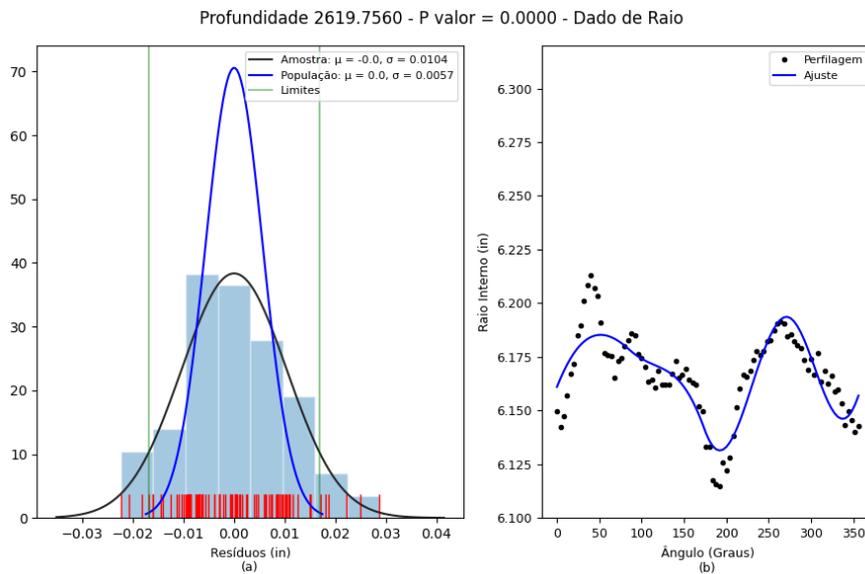


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 58 apresenta uma seção com duas regiões de provável desgaste e uma região de alta dispersão localizada e que não representa um padrão característico de desgaste (canaleta bem definida). Mais uma vez, é possível interpretar que as seções com os P-valores próximos ao limiar da reprovação podem apresentar um padrão mais complexo e de difícil identificação.

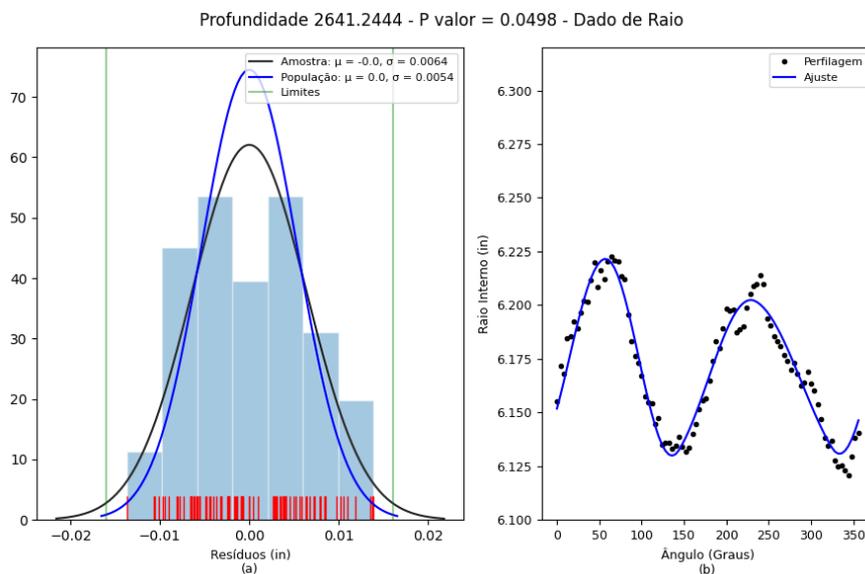
As seções apresentadas da Figura 55 até a Figura 58 revelam um comportamento condizente com seções de corpo de tubular e não sendo, portanto, seções espúrias. Percebe-se também que há certo nível de desgaste quase sempre presente o que acaba por justificar, portanto, uma preocupação acerca da integridade desses tubulares e que também revela a severidade do processo de perfuração. Finalmente, são apresentadas na Figura 59 e na Figura 60 as seções com valores extremos de P-valor dentro do perfil de seções reprovadas da Figura 54.

Figura 59 - Maior P-valor no conjunto de seções reprovadas (Raio)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 60 - Menor P-valor no conjunto de seções reprovadas (Raio)



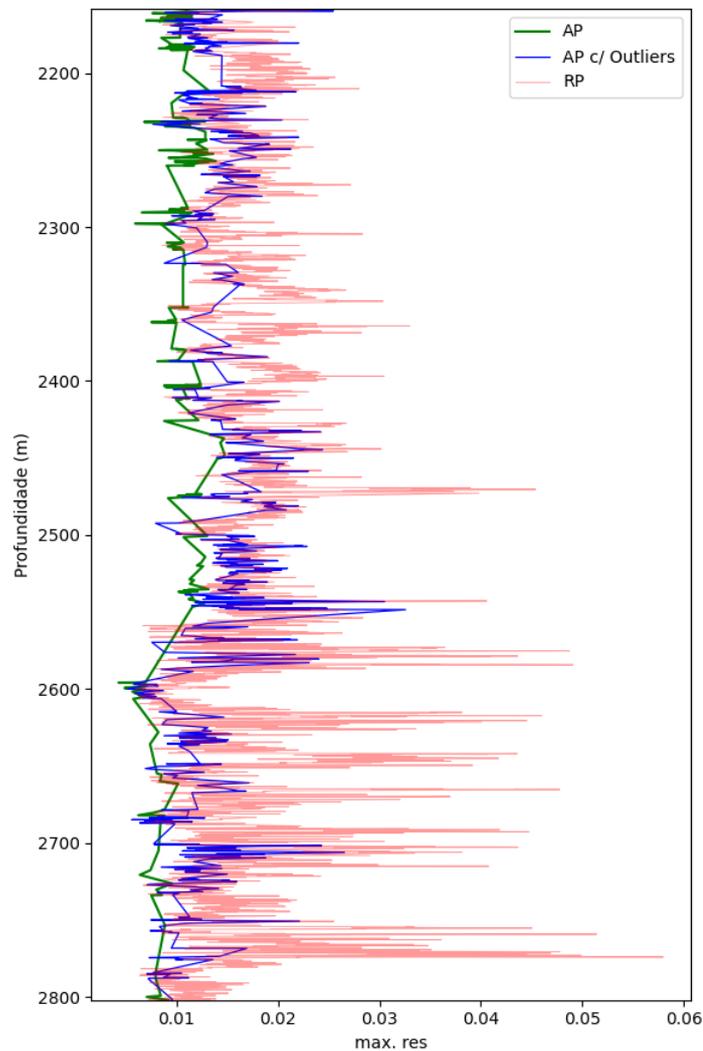
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 59 apresenta uma seção cujo padrão de desgaste é perceptível e em nível elevado, como pode ser observado na seção transversal e também pela quantidade de pontos além do limite de identificação de *outliers*. As características dessa seção são semelhantes as identificadas nas seções virtuais na presença de desgastes maiores (P-valor igual a zero e grande quantidade de pontos com Z-score alto). A Figura 60 encontra-se no limiar (próximo do nível

de significância) da aprovação e reprovação, e é perceptível uma provável região de desgaste na seção transversal.

As seções transversais apresentadas nesta investigação com os dados de raio interno revelam que as seções reais apresentam maiores complexidades devido o comportamento do ruído e diversidade na configuração dos danos (múltiplos pontos de desgaste e geometria diferenciada). Dessa forma, a melhor caracterização dessas seções pode ser feita levando em conta mais critérios do que os considerados no estudo com as seções virtuais, levando em conta, por exemplo, os P-valores dos diferentes quadrantes. A Figura 61 apresenta os diferentes perfis de classificação, porém, utilizando nesta etapa, os dados de espessura.

Figura 61 - Classificação das amostras de resíduos do poço (dados de espessura)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

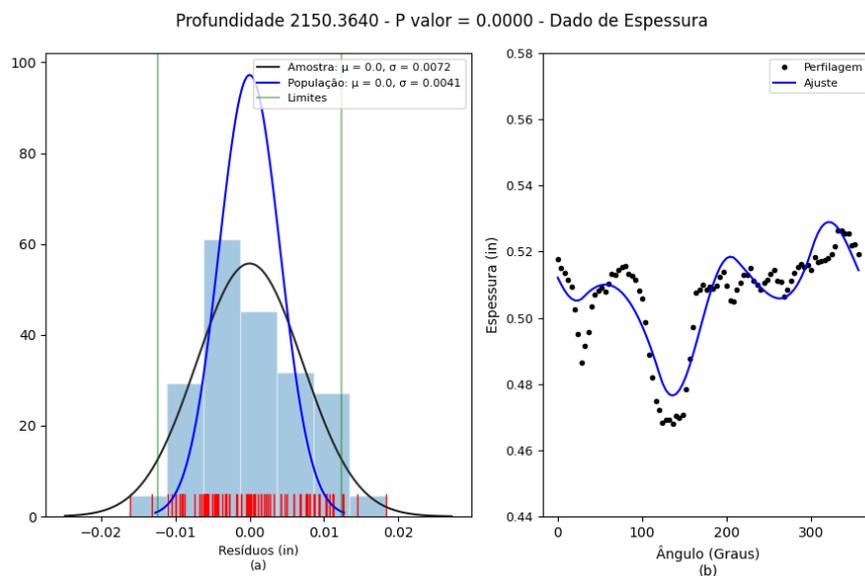
Na Figura 61 é possível perceber que a grande maioria dos dados correspondem as seções reprovadas, a Tabela 19 apresenta a comparação entre a quantidade de pontos. É possível perceber também que no perfil RP, até aproximadamente 2550 m, não há variação significativa nos resíduos máximos como acontece com o raio interno. A partir dos 2550 m os resíduos máximos apresentam padrão mais coerente com a presença do desgaste, isso indica que no início do poço a reprovação não está ocorrendo exatamente pela presença do desgaste. Esse fato pode estar relacionado a problemas no ajuste, como também é indicado na grande quantidade de quadrantes reprovados no teste de *t-Student*. A Figura 62 apresenta exemplo de seção com ajuste problemático encontrado no início do poço.

Tabela 19 - Quantidade de seções para cada classificação baseada no P-valor (Espessura)

Classificação	Porcentagem
AP	6,24%
AP c/ outliers	16,14%
RP	77,62%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 62 - Seção com problemas de ajuste (dado de espessura)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Dessa forma, apesar dos dados possuírem menor ruído, problemas relacionados ao ajuste acabam por impossibilitar uma análise mais confiável de boa parte do poço. Esse problema, como mencionado anteriormente, pode ser devido a presença de possíveis

imperfeições e variações na superfície externa, que quando convertida em raio interno (considerando OD nominal) é totalmente imposta à superfície interna do tubular. Dessa forma, o primeiro ajuste com os dados de espessura torna-se mais problemático.

O perfil de ruído apresentado na Figura 50, em (b), utiliza dados de espessura ao longo do poço. No entanto, utiliza-se os quadrantes aprovados no teste *t-Student* e que, por sua vez, ainda resultam em quantidade suficiente para serem estatisticamente representativos de cada intervalo (a quantidade de seções utilizadas para estimativa do ruído com os dados de espessura foram acima de 30). Além disso, as similaridades identificadas entre os dois perfis, como pontuado anteriormente, reforçam o fato de que os parâmetros estimados estão caracterizando a distribuição do ruído no equipamento.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desse trabalho mostram inicialmente que é possível estimar os parâmetros estatísticos do ruído da medição e que, por sua vez, esses parâmetros podem ser utilizados em conjunto com testes de aderência para melhor avaliar as seções transversais obtidas da perfilagem. Verificou-se que a análise estatística para obtenção desses resultados deve ser feita com os resíduos do ajuste, pois esses dados possibilitam diferenciar mais facilmente o ruído da mediação e o desgaste (há menor influência das imperfeições geométricas).

A estratégia para a estimativa dos parâmetros do ruído mostrou-se apropriada, pois, os erros obtidos nos estudos com as seções virtuais foram pequenos, mesmo com a presença de níveis de ovalização e excentricidade muito elevados. Dessa forma, observa-se que a divisão das seções transversais obtidas da perfilagem em quadrantes, junto com os critérios adotados para a escolha do quadrante representativo (menor média dos quadrados e aprovação no teste *t-Student*) foram suficientes para evitar a influência do desgaste na determinação dos parâmetros estatísticos do ruído.

O teste de aderência mais apropriado para essas aplicações (diferenciação entre desgaste e ruído da medição) é o teste de *Anderson-Darling*. Como foi observado nesse trabalho, a formulação teórica deste teste o torna mais eficiente em capturar as diferenças que surgem devido à presença do desgaste (quando comparado aos demais testes utilizados neste trabalho). Observou-se que essa diferenciação é mais fácil quando o desgaste é causado por uma *tool joint* maior, quando o nível de ruído é menor e, também, quando o próprio nível de desgaste é maior.

Os perfis de ruído obtidos ao longo do poço, no estudo de caso, revelam algumas características das medidas tomadas, como a relação entre o ruído presente nas medidas de raio interno e espessura. Os dados de raio interno possuem níveis de ruído maiores do que os encontrados nos dados de espessura, o que era esperado devido às informações encontradas na literatura a respeito deste tipo de medição. Os resultados com os dados reais também confirmam que o ruído presente nos dados da perfilagem possuem distribuição normal (mesma distribuição estatística que foi considerada no estudo com as seções virtuais). Ao utilizar os estudos que foram propostos neste trabalho, notou-se que a preocupação em relação à integridade dos tubulares é justificada, uma vez que, pelas análises feitas, a grande maioria das seções presentes no poço possuem algum nível de desgaste.

Na análise feita com os dados de raio interno do poço, é possível verificar que os casos de seções reais representam um cenário complexo, possuindo uma ou mais canaletas por exemplo. Esse fato revela que há necessidade de aplicar novas métricas estatísticas e abordagens adicionais em novos testes, como utilizando critérios de avaliação considerando todos os P-valores da seção discretizada.

A recomendação para a análise dos dados de perfilagem é utilizar aqueles que tem o menor nível de ruído, visto que nesse caso a precisão na identificação e quantificação do desgaste é maior. Neste contexto, a melhor escolha seria pelos dados de espessura, no entanto, é preciso verificar a existência de problemas de ajuste quando se utiliza os dados de espessura aliados ao modelo da elipse teórica apresentada neste trabalho.

Uma sugestão de trabalho futuro é realizar um estudo comparativo mais criterioso entre a qualidade do ajuste com os dados de raio interno e com os dados de espessura. Nesse caso, pode-se avaliar se o modelo de geometria elíptica teórica é apropriado com os dados de espessura, pois nesse caso, utiliza-se o artifício de conversão desses dados para raio interno utilizando o valor nominal do diâmetro externo. Esse artifício pode levar imperfeições da superfície externa para a superfície interna e, nesse caso, prejudicar a análise do desgaste da região interna do tubular.

Ainda como trabalho futuro, recomenda-se também um estudo para comparação entre a análise estatística utilizando os resíduos do primeiro ajuste e o do ajuste final. Na estratégia apresentada neste trabalho, é feito ajuste com a geometria elíptica teórica aos dados da perfilagem e, em seguida, os pontos de desgaste são eliminados em iterações sucessivas. Assim, um futuro estudo estatístico de resíduos das demais iterações possibilita avaliar a qualidade da estratégia de obtenção da elipse pré-desgaste.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, L. T. F.; **Análise do colapso de revestimentos desgastados de poços de petróleo sob pressão externa através do método dos elementos finitos**, Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica; 2019.
- ALVAREZ, J. O.; BUZI, E.; ADAMS, R. W.; DEFFENBAUGH, M.; **Theory, Design, Realization, and Field Results of an Inductive Casing Collar Locator**. IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement. Vol. 67. 2018.
- ANDRADE, G. H. S. **Estudo Numérico da Resistencia ao Colapso de Tubos de Revestimento na Presença de Imperfeições Geométricas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Maceió-AL. 2017.
- ANG, A.; TANG, W. **Probability concepts in engineering: emphasis on applications in civil & environmental engineering**. New York: Wiley, 2007. ISBN 9780471720645.
- API TR 5C3. **Technical Report on Equations and Calculations for Casing, Tubing, and Line Pipe Used as Casing or Tubing; and Performance Properties Tables for Casing and Tubing**. 1st. ed. Washington, D.C., 2008.
- ASLANIDIS, P. **Design of the full casing program in a deviated well**. Dissertação (Mestrado em engenharia de petróleo) - Universidade Técnica de Creta, Grécia. 2018.
- AZAR, J.J. and G.R. SAMUEL, 2007. **Drilling Engineering**. PennWell Books, Tulsa, Oklahoma, ISBN: 9781593700720, Pages: 486.
- BERNT, S. A. 1996. **Modern Well Design**. 2 ed. CRC Press, ISBN 978-0-415-88467-9, 2010.
- BOURGOYNE, A. T.; MILLHEIM, K. K. CHENEVERT, M. E.; YOUNG, F. S. **Applied drilling engineering**. Richardson: Society of Petroleum, 1991.
- BRADLEY, W. B. e FONTENOT, J. E. **The prediction and control of casing wear**. *Journal of Petroleum Technology*, Paper SPE 5122. 1975.
- CHANDRASEKHAR, S. V.; ANJOS, J. L.; FRAZÃO, L. E.; BONELLI, R. C.; PERCY, J. G., SANTOS, C. M.; GASPARETO, D.; LIMA, L. B. **Casing Wear Estimation Without a Baseline Log – A Distorted Ellipse Methodology**. Offshore Technology Conference held in Houston, Texas, USA. OTC-29390-MS. 2019.
- CHOWDHURRY, M. S.; TANJIL, H. A.; AKTER, S.; AMIN, M. A.; PAL, S. K. **Production Logging and its Implementation: A Technical Review**. *International Journal of Petroleum and Petrochemical Engineering (IJPPE)*. 2019.
- CHOPRA, PAPP, E.; GIBSON, D. **Geophysical well logging**. Canberra, Australia, 2002.
- DARLING, D. A.; ANDERSON, T. W.; **A Test of Goodness of fit**. 1954. *Journal of the American Statistical Association*. Vol. 49, No. 268.
- DEVORE, Jay L. **Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências**. 6. Ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

- ELLIS, D. V.; SINGER, J. M. **Well logging for Earth Scientists**. 2. Ed. Springer Science + Business Media B. V, 2008. 708 p. ISBN 9781402037382.
- GOUVEIA, L. P. **Avaliação da Confiabilidade de Tubos de Revestimento de Poços**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Alagoas. Maceió-Al. 2014.
- GOUVEIA, L. P., FERRO, A. P. A., FERREIRA, D. V. G., BARBOZA, A. S., PERCY, J. G. **Identificação de Zonas de Desgaste Crítico em Poço Executado a Partir de Dados de Perfilagem Ultrassônica**. ENAHPE, Serra Negra – SP. Agosto de 2019.
- HALL, R.W. et al, February, **Recent Advances in Casing Wear Technology**, Presented at IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, Texas, USA. SPE-27532-MS. 1994.
- JONES, E., OLIPHANT, T., PETERSON, P., et al. **SciPy: Open source scientific tools for Python**. 2001.
- KOEHLER, L. P. **Projeto de Revestimento de Poços e suas especificidades**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal Fluminense (UFF). Niteroi-RJ. 2018
- KORNBERG, E. M. **Improved Casing Collapse Prediction with a Case Study of Asset Life Extension**. Thesis (Petroleum Geoscience and Engineering). Norwegian University of Science and Technology. 2017.
- KUMAR, A., ROBELLO, S. **“Casing Wear Factors: How do They Improve Well Integrity Analyses?”** Paper SPE-173053-MS presented at SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, 17-19 March, London, England, UK. 2015.
- KURIYAMA, Y.; MIMAKI, T.; YONEZAWA, T. **Effect of Wear and Bending on Casing Collapse Strength**. SPE-24597-MS. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 4-7 October, Washington, D. C. 1992.
- LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística aplicada**. 4. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- MITCHELL, S., YANGHUA, X., et al. 2012 **“Improving Casing Wear Prediction and Mitigation Using a Statistically Based Model”** Paper IADC/SPE 151448, presented at IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, San Diego, California, USA, 6-8 March 2012.
- MIOT, H. A. **Avaliação da normalidade dos dados em estudos clínicos e experimentais**. Porto Alegre-RS, 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1677-54492017000200088>. Acesso em: 16 jan. 2020.
- MOORE, D. S; McCABE, G. P; CRAIG, B. A. **Introduction to the Practice of Statistics**. 8. Ed. New York; W.H. Freeman and Company. 2014. ISBN 9781464133381.
- NOÇÕES básicas sobre Testes-t: Para uma amostra, para duas amostras e pareados. **MINITAB**. 22 de Abril de 2019. Disponível em:<<https://blog.minitab.com/pt/noco-es-basicas-sobre-testes-t-para-uma-amostra-para-duas-amostras-e-pareados>>. Acesso em: 26 de Nov. de 2018.

- PEDROSA, Antonio Carvalho; GAMA, Silvério M. A. **Introdução computacional à probabilidade e estatística**. Porto, 2004.
- ROCHA, L. A. S.; AZEVEDO, C. T. **Projetos de Poços de Petróleo**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2009
- RIPMAN, S. **Casing Wear in Multilateral Wells**. Universidade de Stavanger - Noruega. Dissertação de mestrado, 2011.
- SAWARYN, S. J., PATTILLO, P.D., BROWN, C., SCHOEPF, V. “**Assessing Casing Wear in the Absence of a Baseline Calliper Log**” Paper SPE 173143-MS presented at SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, 17-19 March, London, England, UK. 2015.
- SCHLUMBERGER. **USI UltraSonic Imager Tool**. 2004. Disponível em: <<https://www.slb.com/-/media/files/production/product-sheet/usi.ashx>> Acesso em jan. 2020.
- SEITINGER, P. M. **Casing Wear Analysis : An analysis of the parameters causing casing wear in Troll field and possible solutions**. Mining University of Leoben. Austria. 2010.
- SILVA, T. B. **Contribuição à análise de integridade em sistemas de revestimento via confiabilidade estrutural**. Maceió-AL; 2018.
- SILVA, G. T. **Análise Numérica da Resistência ao Colapso em Tubulares de Revestimento de Poços Dotados de Imperfeições de Manufatura e Desgaste**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Alagoas. Maceió-AL; 2020
- SHEN, Z., BECK, F. E. 2012. **Intermediate Casing Collapse Induced by Casing Wear in High-Temperature and High-Pressure Wells**. Paper SPE-155973-MS presented at SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition
- SPIEGEL, Murray R; STEPHENS, Larry J; NASCIMENTO, Jose Lucimar do. **Estatística**, coleção Schaum. Bookman, 2009.
- SUN, Zhifeng, Qiu, Ao, Wang, Wenliang, Tao, Aihua, Chen, Honghai, Liu, Xien., 2012, “**Design of Multi-functional Ultrasonic Imaging Logging Tool**,” Acoustic 2012 Hong Kong Conference and Exhibition, Hong Kong, May 13- May 18, 2012.
- THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.
- SCHULUMBERGER. **1920s: The First Well Log**. 2010. Disponível em:< <https://www.slb.com/who-we-are/our-history/1920s>>. Acesso em: 25-05-2020.
- SERRA, O. **The Fundamentals of Well Log Interpretation**. 3. Ed. New York; Elsevier, 1988. ISBN 0444421327.
- SEO, S. **A Review and Comparison of Methods for detecting Outliers in Univariate Data Sets**. University of Pittsburgh. Master Thesis. 2006.
- SHARP, D. P.; MAIDA, J. L.; SAMSON, E. M. **Casing Collar Locator With Wireless Telemetry Support**. US20130249705A1. 2012.

- TORMAN, V. B. L.; BIRCK, A. R.; RIBOLDI, J.; **Comparação dos Testes de Aderência à Normalidade Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, Cramer-von Mises e Shapiro-Wilk por Simulação.** 11º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agrônômica (SEAGRO), 2005.
- VIGGEN, E. M.; HARSTAD, E.; KVALSVIK, J. **Getting Started with Acoustic Well Log Data Using the Dlisio Python Library On the Volve Data Village Dataset.** Proceedings of the 43th Scandinavian Symposium on Physical Acoustics. Geilom Noruega. 2020.
- YAP, B. W.; SIM, C. H. **Comparisons of various types of normality tests.** Journal of Statistical Computation and simulation. 81-12, 2141-2155. 2011