

ANA LUIZA MARTINS GOMES SILVA

**DETERMINAÇÃO DA FLEXIBILIDADE ELÁSTICA
DE EQUIPAMENTOS DE INDENTAÇÃO
INSTRUMENTADA**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2023

ANA LUIZA MARTINS GOMES SILVA

**DETERMINAÇÃO DA FLEXIBILIDADE ELÁSTICA DE
EQUIPAMENTOS DE INDENTAÇÃO INSTRUMENTADA**

Monografia apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **BACHAREL EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rosenda Valdés Arencibia

UBERLÂNDIA – MG

2023

AGRADECIMENTOS

Inicialmente a Deus, que me concedeu inteligência e capacidade para concretização desse trabalho.

Aos meus pais Ricardo Martins Gomes e Denismar Batista da Silva, e à minha irmã Beatriz Martins Gomes Silva por todo apoio e incentivo em tudo que me proponho a fazer em minha vida.

À minha orientadora Prof^a. Rosenda Valdés Arencibia pela excelência do suporte e orientação fornecidos ao longo deste projeto e pelo seu precioso conhecimento compartilhado, desempenhando um papel fundamental no meu crescimento científico e pessoal.

Ao Prof. Sinésio Domingues Franco por me dar a oportunidade de realizar minha iniciação científica e projeto de conclusão de curso no LTAD.

Ao engenheiro Dr. Luiz Fernando Maia de Almeida que compartilhou seus conhecimentos e contribuiu significativamente na melhoria desse trabalho.

A todo o time do LTAD que sempre foram muito prestativos durante todo o período de minha iniciação científica e que me ajudaram de forma direta ou indireta.

A todos amigos que adquiri durante a graduação, por me acompanharem em todas as dificuldades encontradas neste período.

SILVA, A. L. M. G. **Determinação da flexibilidade elástica de equipamentos de indentação instrumentada**. 2023. 57f. Monografia de Projeto de Fim de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

Atualmente, os ensaios de indentação instrumentada estão ganhando cada vez mais importância, pois representam um método de medição promissor que permite avaliar várias propriedades mecânicas utilizando pequenos volumes de material. Ao contrário dos métodos tradicionais de medição de dureza, os quais analisam apenas a resposta plástica do material, o ensaio de Indentação Instrumentada registra em tempo real tanto a força aplicada quanto o deslocamento resultante da ação do penetrador no corpo de prova. Isso possibilita a avaliação das respostas elásticas e plásticas do material durante o processo de indentação, permitindo o cálculo de várias propriedades estáticas em pequenas amostras de material. Uma vantagem significativa dessa abordagem é a economia de tempo, especialmente na preparação do corpo de prova. No entanto, a análise dos dados e, conseqüentemente, os resultados podem ser influenciados por diversos fatores. Dentre eles, é possível citar a qualidade da superfície do corpo de prova, o desgaste da ponta do indentador, sua geometria e material, bem como a flexibilidade elástica da estrutura da máquina de ensaio. Quando a estrutura da máquina de ensaio possui flexibilidade elástica diferente de zero, ocorrem deslocamentos não apenas no indentador, mas também na própria estrutura, especialmente quando são aplicadas forças de indentação elevadas, fenômeno que impacta negativamente nos resultados das medições. Dessa forma, no presente trabalho, avaliou-se a flexibilidade elástica de dois equipamentos de indentação instrumentada – o PropinSitu II e o Stress-Strain Microprobe® (SSM-M1000™) - baseando-se no método de regressão linear da função C_t vs. $F^{-0,5}$, proposto por Ullner et al. (2010). Assim, os valores de flexibilidade elástica obtidos para os equipamentos PropinSitu II e SSM-M1000™ foram de $C_m \sim 6,6$ nm/N e $C_m \sim 4,1$ nm/N, respectivamente. Ao analisar esses resultados, duas conclusões principais podem ser destacadas: o equipamento SSM-M1000™ exibe uma rigidez superior em comparação com o PropinSitu II, e os baixos valores de flexibilidade elástica sugerem que não há comprometimento significativo sobre os ensaios de indentação realizados nos equipamentos avaliados.

Palavras-Chave: indentação instrumentada, flexibilidade elástica, métodos analíticos, regressão linear.

SILVA, A. L. M. G. **Determination of the compliance of instrumented indentation equipment.** 2023. 57p. Monography, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

Currently, instrumented indentation tests are becoming increasingly important, as they represent a promising measurement method that allows a variety of mechanical properties to be measured using small volumes of material. Unlike traditional hardness measurement methods, which only analyze the plastic response of the material, the instrumented indentation test records in real time both the force applied and the displacement resulting from the action of the penetrator on the specimen. This makes it possible to evaluate the elastic and plastic responses of the material during the indentation process, allowing the calculation of various static properties on small material samples. A significant advantage of this approach is that it saves time, especially in preparing the specimen. However, the analysis of the data and, consequently, the results can be influenced by various factors. These include the quality of the specimen surface, the wear of the indenter tip, its geometry and material, as well as the compliance of the testing machine frame. When the structure of the testing machine has non-zero compliance, displacements occur not only in the indenter, but also in the structure itself, especially when high indentation forces are applied, a phenomenon which has a negative impact on the measurement results. Therefore, this study evaluated the compliance of two instrumented indentation machines - the PropinSitu II and the Stress-Strain Microprobe® (SSM-M1000™) - based on the linear regression method of the C_t vs. $F^{-0,5}$, function proposed by Ullner et al. (2010). Thus, the compliance values obtained for the PropinSitu II and SSM-M1000™ machine were $C_m \sim 6,6$ nm/N and $C_m \sim 4,1$ nm/N, respectively. When analyzing these results, two main conclusions can be noted: the SSM-M1000™ machine exhibits superior stiffness compared to the PropinSitu II, and the low elastic flexibility values suggest that there is no significant compromise on the indentation tests carried out on the machine evaluated.

Keywords: instrumented indentation, compliance, analytical methods, linear regression.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Comportamento característico da curva tensão-deformação, (adaptado de CALLISTER JR., 2002, p. 86 e 88).	7
Figura 2.2 - Tipos mais comuns de penetradores utilizados em ensaio de dureza adaptado de (CALLISTER JR., 2002, p. 95).	10
Figura 2.3 - Diagrama esquemático do indentador, adaptado de (CARDOSO, 2004).	11
Figura 2.4 - Curva característica de um ensaio de macroindentação instrumentada, adaptada de (HAGGAG, 1993).	13
Figura 2.5 - Perfil típico da indentação quando se utiliza um penetrador esférico, adaptada de (HAGGAG, 1993).	13
Figura 2.6 – Equipamento de indentação instrumentada PropinSitu II	16
Figura 2.7 – Dispositivo de indentação in situ SSM-M1000™	17
Figura 2.8 – Esquema representativo da flexibilidade elástica de uma máquina de ensaio de indentação instrumentada (adaptada de Kholkhujaev et al., 2023).	19
Figura 2.9 – Fontes de incerteza do ensaio de indentação instrumentado (adaptada de Ullner, 2004)	20
Figura 3.1 – Corpos de prova após a realização dos ensaios de macroindentação instrumentada.	25
Figura 3.2 – Fluxograma do procedimento aplicado para determinação da flexibilidade elástica dos equipamentos de indentação instrumentada PropinSitu II e SSM-M1000™	27
Figura 3.3 - Análise Doerner-Nix de curvas de descarregamento (adaptada de Doerner e Nix, 2004).	28
Figura 4.1 – Curva Força vs Deslocamento do aço AISI 4340 - 28 HRC.	31
Figura 4.2 – Curva Força vs Deslocamento do aço AISI 4340 - 32 HRC.	31
Figura 4.3 - Curva Força vs Deslocamento do aço AISI 4340 - 40 HRC.	31
Figura 4.4 - Curva Força vs Deslocamento do aço AISI 4137M.	32
Figura 4.5 - Curva Força vs Deslocamento do aço AISI 4130M.	32
Figura 4.6 - Retas de regressão linear dos valores de C_t e $F_{\max}^{-0,5}$ obtidos nos ensaios de indentação no equipamento PropinSitu II.	34
Figura 4.7 - Curva Força vs Deslocamento do aço AISI 4340 - 28 HRC.	35
Figura 4.8 - Curva Força vs Deslocamento do aço AISI 4340 – 32 HRC.	36
Figura 4.9 - Curva Força vs Deslocamento do aço AISI 4340 – 40 HRC.	36
Figura 4.10 - Curva Força vs Deslocamento do aço AISI 4137M.	36
Figura 4.11 - Curva Força vs Deslocamento do aço AISI 4130M.	37

Figura 4.12 - Retas de regressão linear dos valores de C_t e $F_{\max}^{-0,5}$ obtidos nos ensaios de indentação no equipamento SSM-M1000™.....	39
Figura 4.13 - Valores médios de flexibilidade elástica para ambos os equipamentos. As barras de erros representam o desvio padrão para um nível de confiança de 68,27 %.	40
Figura 4.14 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos.	41
Figura 4.15 - Gráficos dos resíduos da regressão para os cinco materiais ensaiados no Propinsitu II.....	42
Figura 4.16 - Gráficos dos resíduos para os cinco materiais ensaiados no SSM-M1000™..	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação entre os ensaios de tração e de indentação instrumentada (ISO/TR 29381, 2008).	8
Tabela 3.1 – Valores limites de profundidade de indentação.	26
Tabela 4.1 – Resultados de C_t e $F_{\max}^{-0,5}$ obtidos no ensaio com aço AISI 4340 - 28 HRC ..	33
Tabela 4.2 – Resultados de C_t e $F_{\max}^{-0,5}$ obtidos no ensaio com aço AISI 4340 - 32 HRC ...	33
Tabela 4.3 – Resultados de C_t e $F_{\max}^{-0,5}$ obtidos no ensaio com aço AISI 4340 - 40 HRC ...	33
Tabela 4.4 – Resultados de C_t e $F_{\max}^{-0,5}$ obtidos no ensaio com aço AISI 4137M.....	33
Tabela 4.5 – Resultados de C_t e $F_{\max}^{-0,5}$ obtidos no ensaio com aço AISI 4130M	34
Tabela 4.6 – Equações da reta e coeficiente de determinação obtidos para cada corpo de prova	35
Tabela 4.7 – Resultados de C_t e $F_{\max}^{-0,5}$ obtidos no ensaio com aço AISI 4340 - 28 HRC ...	37
Tabela 4.8 – Resultados de C_t e $F_{\max}^{-0,5}$ obtidos no ensaio com aço AISI 4340 - 32 HRC ..	37
Tabela 4.9 – Resultados de C_t e $F_{\max}^{-0,5}$ obtidos no ensaio com aço AISI 4340 - 40 HRC....	38
Tabela 4.10 – Resultados de C_t e $F_{\max}^{-0,5}$ obtidos no ensaio com aço AISI 4137M.....	38
Tabela 4.11 – Resultados de C_t e $F_{\max}^{-0,5}$ obtidos no ensaio com aço AISI 4130M.....	38
Tabela 4.12 – Equações da reta e coeficiente de determinação obtidos para cada corpo de prova.	39
Tabela 4.13 – Resultados de ANOVA para os valores individuais da flexibilidade elástica ..	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivo geral	2
1.2. Justificativa.....	3
1.3. Estrutura do trabalho	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Ensaio mecânicos.....	4
2.1.1. <i>Visão geral sobre ensaios mecânicos e propriedades mecânicas dos materiais</i>	4
2.1.2. <i>Comparativo entre o ensaio de tração e ensaio de indentação instrumentada</i> .	6
2.2. Ensaio de indentação instrumentada.....	9
2.2.1. <i>Aspectos gerais do ensaio de indentação instrumentada</i>	9
2.2.2. <i>Ensaio de macroindentação instrumentada</i>	12
2.3. Equipamentos de ensaio de indentação instrumentada.....	14
2.3.1. <i>PropinSitu II</i>	14
2.3.2. <i>Stress-Strain Microprobe® (SSM-M1000™)</i>	16
2.4. Flexibilidade Elástica	18
2.5. Metodologias para avaliação da flexibilidade elástica em máquinas de macroindentação instrumentada	21
2.5.1. <i>Método ISO 14577-2</i>	21
2.5.2. <i>Método de regressão linear da função C_t vs. $F^{-0,5}$</i>	22
3. METODOLOGIA.....	24
3.1. Seleção e caracterização dos corpos de prova.....	24
3.2. Ensaio de macroindentação instrumentada	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
4.1. Resultados dos ensaios no equipamento PropinSitu II	30
4.2. Resultados dos ensaios no equipamento SSM-M1000™	35
4.3. Análise estatística dos resultados obtidos	40
5. CONCLUSÕES.....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

A engenharia mecânica contemporânea está em constante busca pelo desenvolvimento de tecnologias e equipamentos mais sofisticados, com o objetivo de satisfazer as necessidades dos projetos e diminuir os custos de produção. Em uma de suas vertentes, a engenharia mecânica concentra-se em assegurar a integridade de estruturas metálicas, visando prevenir falhas durante a utilização, avaliar a vida útil da estrutura e analisar suas condições operacionais. Isso é alcançado por meio de pesquisas acerca do comportamento, da composição química e das propriedades mecânicas dos materiais utilizados para esse propósito.

Nesse cenário, o Ensaio de Indentação Instrumentada tem despertado o interesse de pesquisadores por ser um método fácil e rápido para obtenção de várias propriedades mecânicas dos metais, uma vez que necessita apenas de pequenos volumes de materiais. Sendo assim, enquanto os métodos de medição de dureza padronizados examinam apenas a resposta plástica do material amostrado, o Ensaio de Indentação Instrumentada baseia-se no registro em tempo real da força aplicada e do deslocamento resultante da ação do penetrador no corpo de prova, possibilitando avaliar a resposta elástica e plástica do material examinado durante o processo de indentação e, conseqüentemente, permite o cálculo de várias propriedades mecânica estáticas de materiais em pequenas de amostras (ZÍTA et al., 2018).

A grande vantagem deste método é que ele permite obter as propriedades mecânicas do material de maneira não destrutiva ou quase não destrutiva, a partir de ensaios realizados na própria estrutura (*in situ*), sem a necessidade de interromper o funcionamento da mesma. Além disso, outra vantagem é a economia de tempo, pois quando realizado em laboratório,

os ensaios de indentação instrumentada apenas requerem a fabricação de corpos de prova de geometria simples, diferentemente de outros ensaios para determinação de propriedades mecânicas.

Entretanto, a análise de dados – e, portanto, os resultados – podem ser influenciados por certos fatores, sendo os mais relevantes a qualidade da superfície do corpo de prova, o desgaste do indentador, sua geometria e a rigidez, isto é, a flexibilidade elástica do sistema de ensaio que é composto pela estrutura da máquina de ensaio, instrumentação do corpo de prova e da porta amostra.

A exatidão dos resultados de medição da flexibilidade elástica do sistema de aplicação da força desempenha um papel fundamental nos ensaios de indentação instrumentada, pois os deslocamentos registrados são uma combinação dos deslocamentos no corpo de prova e no sistema de força. Portanto, para obter valores dos deslocamentos no corpo de prova com maior exatidão é essencial ter um conhecimento da flexibilidade elástica do sistema de força. Esta exatidão é especialmente crucial em situações de indentações consideravelmente grandes realizadas em materiais com alto módulo de elasticidade, onde o deslocamento do sistema de força pode representar uma proporção significativa do deslocamento total.

1.1. Objetivo geral

O presente estudo foi desenvolvido com o objetivo de determinar as constantes para correção da altura de indentação devido ao efeito da flexibilidade elástica do sistema de ensaio (estrutura + corpo de prova e suporte) de dois equipamentos que executam o Ensaio de Indentação Instrumentada (PropinSitu II e Stress-Strain Microprobe® SSM-M1000™) localizados no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Assim, serão revisados métodos já existentes para corrigir a flexibilidade elástica da estrutura buscando reduzir os seus efeitos na avaliação das propriedades mecânicas dos aços de alta resistência e baixa liga, e, posteriormente, será aplicada uma metodologia para obtenção da flexibilidade elástica a partir de indentações em blocos padrão de dureza conhecida. Por último, os resultados obtidos serão discutidos e tratados estatisticamente.

1.2. Justificativa

Os equipamentos de Indentação Instrumentada PropinSitu II e Stress-Strain Microprobe® SSM-M1000™ escolhidos nesse trabalho para determinação das constantes de correção de altura devido aos efeitos da flexibilidade elástica são parte integrante dos dispositivos disponíveis no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste da Universidade Federal de Uberlândia.

Esses equipamentos são frequentemente utilizados em ensaios com os mais variados propósitos e a avaliação da influência da flexibilidade elástica da estrutura sobre os resultados obtidos desempenha um papel significativo para garantir a precisão e confiabilidade dos dados nas pesquisas conduzidas.

1.3. Estrutura do trabalho

Esta monografia está estruturada em cinco capítulos:

O capítulo II apresenta a revisão bibliográfica ensaios mecânicos, ensaios de indentação instrumentada, equipamentos de ensaio de indentação instrumentada, flexibilidade elástica e metodologias para avaliação da flexibilidade elástica em máquinas de macroindentação instrumentada.

O capítulo III aborda a metodologia e procedimentos utilizados para o desenvolvimento da monografia.

O capítulo IV apresenta e discute os resultados obtidos.

O capítulo V traz as conclusões e propostas para pesquisas futuras.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica dos tópicos necessários para o desenvolvimento do trabalho, sendo estes: ensaios mecânicos, ensaios de indentação instrumentada, equipamentos de ensaio de indentação instrumentada, flexibilidade elástica e metodologias para avaliação da flexibilidade elástica em máquinas de macroindentação instrumentada.

2.1. Ensaio mecânicos

2.1.1. Visão geral sobre ensaios mecânicos e propriedades mecânicas dos materiais

Por vezes, e por diversos motivos, a constituição (ex.: composição química e microestrutura) e as propriedades mecânicas do material utilizado na fabricação de um equipamento podem não ser plenamente conhecidas. Essa situação pode ocorrer, por exemplo, em estruturas utilizadas para transportar petróleo, especialmente aquelas mais antigas, nas quais a documentação técnica pode apresentar imprecisões ou, em alguns casos, ser inexistente. Como resultado, a integridade estrutural pode ser comprometida, tornando a avaliação mais complexa, dispendiosa e, em alguns casos, inviável (KANIA; RUSSEL; GAO, 2004).

Desse modo, verificar a integridade de estruturas metálicas é crucial para garantir que descontinuidades não se propaguem durante a utilização e para avaliar sua durabilidade e condições operacionais. Para avaliar a integridade dessas estruturas, é necessário ter conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais, bem como das dimensões e da

extensão dos efeitos induzidos, como aqueles causados durante o processo de soldagem (HAGGAG et al., 1990).

Além disso, a compreensão e o conhecimento das propriedades mecânicas são fundamentais para a escolha de um material para diferentes contextos e aplicações e ao avaliar a durabilidade da estrutura ao longo do tempo. Isso porque, essas propriedades definem como um material se comporta sob forças mecânicas, uma vez que estão diretamente ligadas à capacidade do material de resistir ou transmitir essas forças aplicadas sem se romper ou deformar de forma incontrolável (SOUSA, 2011).

As principais propriedades mecânicas a serem consideradas na escolha de um material são:

- Resistência à tração, isto é, a máxima tensão mecânica a qual um material pode ser exposto antes de falhar;
- Elasticidade, isto é, a capacidade de um material retornar às suas características originais após a remoção de uma tensão;
- Ductilidade, isto é, capacidade de um material sofrer deformação plástica sem fraturar quando submetido a tensão;
- Fluência, isto é, a deformação gradual de um material sob força constante (inferior ao limite de escoamento) ao longo do tempo;
- Fadiga, isto é, a resistência do material a falhas sob forças cíclicas ou repetitivas.
- Dureza, isto é, a resistência à deformação plástica ou à penetração de um corpo duro.;
- Tenacidade à fratura, isto é, a resistência do material à propagação de trincas.

A avaliação das propriedades mecânicas é conduzida por meio de ensaios mecânicos, mas, idealmente, a melhor maneira de entender o desempenho de um material é submetê-lo a situações reais de uso. Infelizmente, devido a restrições técnicas e financeiras, essa prática geralmente não é viável. Para tanto, é crucial encontrar métodos mais rápidos e econômicos para avaliar com precisão como esses materiais se comportam em situações reais de uso.

Na maioria das vezes, não é possível realizar o ensaio mecânico em toda a peça ou estrutura, sendo realizado, como alternativa, em uma parte dela ou em partes menores do material com que foi fabricada, isto é, amostras. Conforme afirmado por Cardoso (2004), essas amostras, que seguem formas e dimensões padronizadas, são chamadas de corpos de prova. Para assegurar a comparabilidade dos resultados, esses corpos de prova são fabricados conforme diretrizes estabelecidas por organizações como a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e *American Society for Materials* (ASM).

Dessa forma, para superar essas dificuldades e assegurar a integridade de estruturas em situações em que as propriedades mecânicas do material são desconhecidas, é necessário realizar ensaios que podem ser classificados em dois tipos: ensaios destrutivos, os quais utilizam corpos de prova de grandes dimensões usinados a partir de amostras retiradas da estrutura em análise, como o caso do ensaio de tração convencional; ou ensaios *in situ* (não destrutivos), os quais são realizados no local com o uso de equipamentos portáteis, como o caso do ensaio de macroindentação instrumentada (NICOLOSI, 2015).

Certos ensaios mecânicos, como o "mini Charpy", o "*small punch test*" e o ensaio de tração em corpos de prova miniaturizados permitem a análise de pequenos volumes de material, utilizando corpos de prova de dimensões reduzidas. Embora esses ensaios não comprometam a integridade da estrutura em análise, eles ainda requerem a remoção de uma amostra, o que nem sempre é viável. Nesse contexto, a macroindentação instrumentada apresenta uma vantagem significativa, pois permite obter de maneira rápida e aproximada as propriedades mecânicas de tração de materiais metálicos em estruturas sem a necessidade de retirar qualquer tipo de amostra. Isso significa que a operação não precisa ser interrompida, um fato particularmente crucial em setores como o de óleo e gás, nos quais a interrupção ou as paradas de equipamentos e sistemas implicam em custos operacionais significativos (RAMOS NETO, *et al.*, 2004; FRANCO, 2007).

2.1.2. Comparativo entre o ensaio de tração e ensaio de indentação instrumentada

Cardoso (2004) afirma que um dos ensaios mecânicos mais usuais e importantes é o de tração, pois permite fornecer informações sobre a resistência dos materiais e pode definir critérios de aceitação para especificação de materiais, controlar os métodos de fabricação, auxiliar no desenvolvimento de novos materiais e avaliar as propriedades mecânicas para uso em projetos.

No ensaio de tração, um corpo de prova com formas e dimensões padronizadas é submetido a uma carga ou força de tração uniaxial, paulatinamente crescente, que tende a esticá-lo ou alongá-lo, promovendo uma deformação progressiva de aumento de comprimento como determina a ABNT NBR ISO 6892 (ABNT, 2002)

Graficamente, o ensaio de tração é representado por uma curva tensão versus deformação, conforme apresentado na Figura 2.1, na qual podem ser notadas duas fases: elástica e plástica.

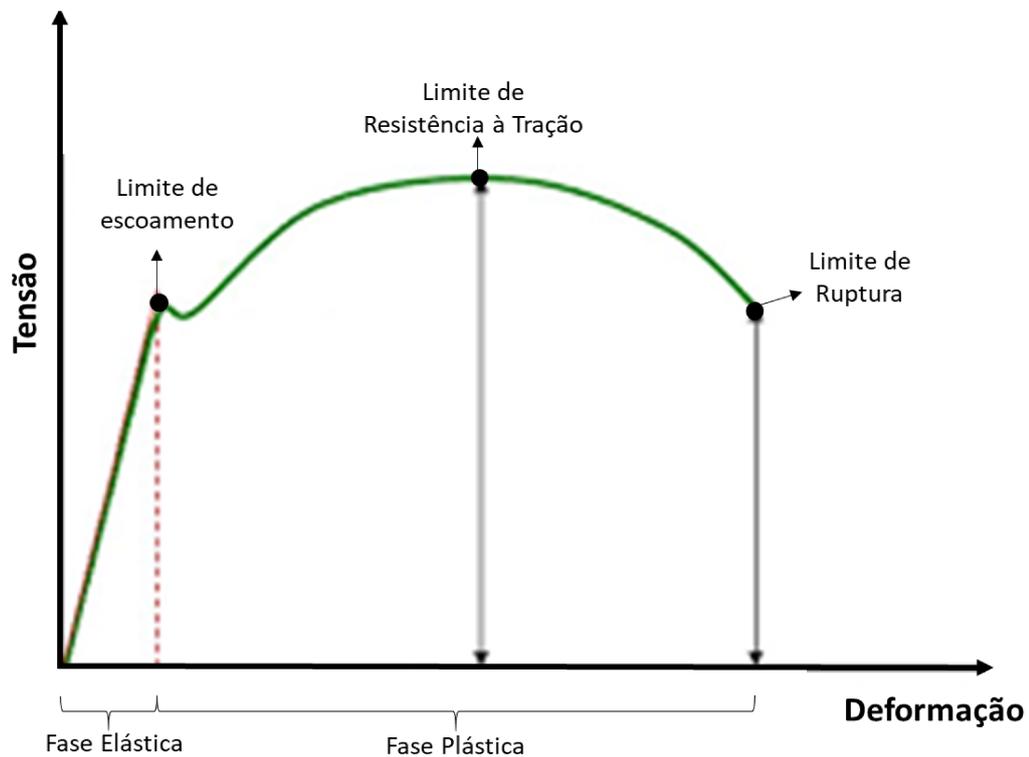


Figura 2.1 – Comportamento característico da curva tensão-deformação, (adaptado de CALLISTER JR., 2002, p. 86 e 88).

Na região elástica, o material se deforma temporariamente e de forma reversível quando a força é aplicada. Se o esforço for removido, o material volta às suas dimensões originais. Nesta fase, o comportamento do material é linear, obedecendo à Lei de Hooke, a qual estabelece uma relação linear entre a tensão e a deformação (Equação 2.1).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

Na Equação 2.1, “E” é uma constante elástica chamada de módulo de elasticidade ou módulo de Young e representa a capacidade de resistência do material às deformações na fase elástica.

Quando a força aplicada excede um certo limite, o material deixa a região elástica e entra na região plástica. Na região plástica, a deformação é permanente e não é mais totalmente recuperável quando o esforço é removido. Também, o material é deformado plasticamente de forma significativa sem um correspondente aumento expressivo na tensão. Durante esta fase, as deformações são irreversíveis, indicando que o material está passando por uma mudança permanente em sua estrutura interna. Propriedades como limite de escoamento (limite entre

a região elástica e região plástica) e limite de resistência são determinadas a partir dessa região.

Em contrapartida, o ensaio de indentação instrumentada representa um nível mais avançado de ensaio de dureza. O seu princípio baseia-se no monitoramento e registro do ciclo completo de aplicação e remoção da força de ensaio, no qual são fornecidas informações sobre a resposta elástico-viscoplástica localmente dependente do material. Por meio de geometrias de indentadores específicas e ciclos de força, foram propostos diversos métodos para os obter parâmetros dos materiais, geralmente possíveis de serem determinados também por ensaios de pressão ou tração (ULLNER et al., 2010)

Dessa forma, nota-se que uma das principais vantagens do ensaio de indentação instrumentada é a possibilidade de realizar ensaios não destrutivos em componentes em serviço, em aplicações de campo onde o ensaio de tração convencional não é viável (ISO/TR 29381, 2008). A Tabela 2.1 apresenta um resumo das características desses dois métodos: indentação e tração.

Tabela 2.1 – Comparação entre os ensaios de tração e de indentação instrumentada (ISO/TR 29381, 2008).

	Tração (Convencional)	Macroindentação Instrumentada
Caracterização das Propriedades	Representativa de grande parte do volume do material	Local e representativa apenas da região superficial
Natureza do ensaio	Destrutivo	Não destrutivo
Preparação	Demanda remoção de amostras e usinagem destas	Apenas lixamento da superfície do equipamento analisado
Principais Aplicações	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio em laboratório • Amostras de grande volume 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio em campo (<i>in situ</i>) • Amostras de pequeno volume

Devido às vantagens oferecidas pelo ensaio de indentação, essa técnica tem sido amplamente utilizada para avaliar as propriedades mecânicas dos materiais em diversas situações. Isso inclui a investigação dos efeitos de tratamentos térmicos em novas ligas

metálicas, o estudo de fenômenos de degradação, a análise da fragilização por hidrogênio, pesquisas em condições de altas temperaturas, a estimativa de tensões residuais em juntas soldadas e a avaliação da tenacidade à fratura de aços, entre diversas outras aplicações (NICOLSI, 2015).

2.2. Ensaio de indentação instrumentada

2.2.1. Aspectos gerais do ensaio de indentação instrumentada

No geral, os ensaios de indentação - ou penetração - são realizados por meio da aplicação de uma força em penetradores com diferentes geometrias, tais como cônicas, piramidais e esféricas, nos quais mede-se a força aplicada e a área da impressão deixada na superfície do corpo de prova, a fim de caracterizar a dureza do material ensaiado. Ainda, chama-se de indentação instrumentada, quando esse ensaio é conduzido com o monitoramento e registro dos valores de força aplicada e profundidade de penetração por meio de sensores.

A Figura 2.2 apresenta os principais objetos de penetração (indentação) usados em ensaios de dureza. Assim, é possível observar que a geometria dos penetradores de diamante, incluindo o piramidal e o cônico, possuem ângulos que tornam sua fabricação um processo difícil. Além disso, esses penetradores podem resultar em trincas no material na região que foi ensaiada. Dessa forma, uma alternativa encontrada para superar essas dificuldades é a utilização de penetradores esféricos.

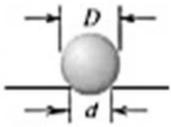
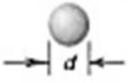
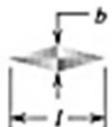
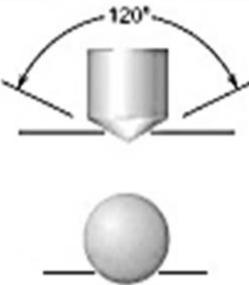
<i>Ensaio</i>	<i>Indentador</i>	<i>Vista Lateral</i>	<i>Vista Superior</i>
Brinell	Esfera de WC-Co		
Vickers	Pirâmide de Diamante		
Knoop	Pirâmide de Diamante		
Rockwell	Cone de diamante e esfera de aço		 

Figura 2.2 - Tipos mais comuns de penetradores utilizados em ensaio de dureza adaptado de (CALLISTER JR., 2002, p. 95).

De acordo com Neto e Franco (2002), define-se a Indentação Esférico-Instrumentada (IEI) como um ensaio de indentação realizado com penetradores esféricos com monitoramento das grandezas de deslocamento e força. Esse método é usado para obter as propriedades do material e é baseado em múltiplas indentações no mesmo local de penetração na superfície metálica. Assim, a força aplicada e a profundidade de penetração (deslocamento) são medidas continuamente por meio de uma célula de carga e um LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), respectivamente. Para realizar esse ensaio, recomenda-se utilizar um penetrador esférico feito de Carboneto de Tungstênio-Cobalto (WC-Co), devido à sua alta dureza em comparação aos tipos de aços ensaiados.

A principal vantagem do método de IEI é a capacidade de medir as propriedades mecânicas do material em escalas micro e nanométricas, permitindo a análise de amostras muito pequenas ou regiões específicas de um material. Além disso, o método é relativamente simples e rápido, proporcionando a realização de múltiplas medições em um curto período de tempo.

A Figura 2.3 exibe um diagrama esquemático de uma ferramenta de indentação, composta por uma esfera, uma porta-esfera e uma haste. Esses elementos serão referidos daqui em diante como o "indentador" ou "penetrador esférico", para fins de simplificação.

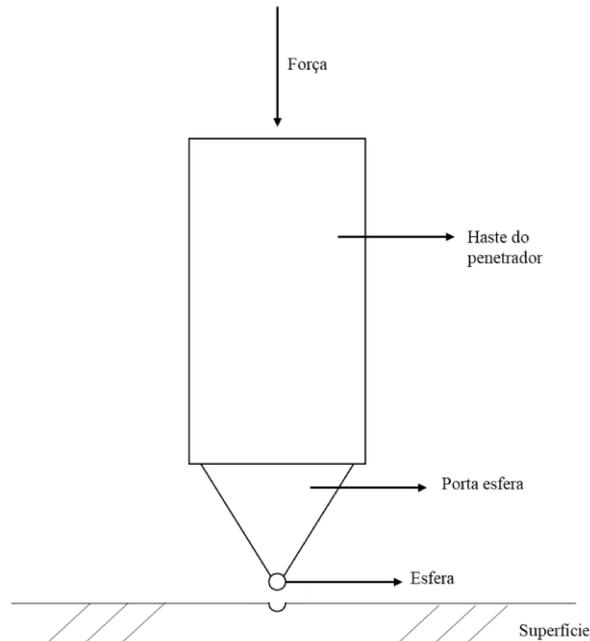


Figura 2.3 - Diagrama esquemático do indentador, adaptado de (CARDOSO, 2004).

No processo de indentação esférica, a similaridade geométrica não é mantida à medida que a penetração aumenta durante os ciclos sucessivos. Como resultado, a pressão média (ou dureza) aumenta com o acréscimo da força, sendo esse princípio fundamental para o ensaio de indentação esférica. Ao realizar esse ensaio, à medida que são feitas múltiplas indentações, tanto a força quanto a geometria da indentação mudam progressivamente. Dessa forma, cada ciclo de indentação está associado a valores específicos de tensão verdadeira e deformação plástica verdadeira. Esses valores, provenientes de cada ciclo de indentação, contribuem para a formação da curva de escoamento (TRICHY, 2005).

A norma ISO/DIS 14577 (ISO, 2015), responsável por regulamentar os ensaios de indentação instrumentada para obtenção de dureza e outros parâmetros em materiais metálicos, apresenta uma classificação dos ensaios em diferentes categorias de acordo com a escala da impressão deixada pelo indentador, sendo elas ISO 14577 (ISO, 2015):

- i. Macro: para as forças aplicadas entre 2 N e 30 kN;
- ii. Micro: para forças de ensaios menores que 2 N e profundidade de penetração maior que 200 nm; e
- iii. Nano: para profundidades de penetração menores ou iguais a 200 nm.

Para visualizar a impressão deixada por uma nanoindentação, conforme Cardoso (2004), é necessário o uso de equipamentos como microscópios eletrônicos de varredura. Já para

observar a impressão de uma microindentação, é suficiente utilizar um microscópio óptico, enquanto a impressão deixada por uma macroindentação pode ser visualizada a olho nu.

2.2.2. *Ensaio de macroindentação instrumentada*

Nos últimos anos, a avaliação de propriedades mecânicas como o limite de escoamento e a resistência à tração tem sido conduzida por meio de modernos ensaios de macroindentação instrumentada diretamente no duto. Esse método é não-destrutivo e não requer a interrupção do processo, conforme descrito por Haggag (2001).

Um ensaio de indentação é classificado como um ensaio de macroindentação quando é realizado com forças compressivas na faixa de 2 N a 30 kN, ISO 14577 (ISO, 2015). O método de macroindentação foi desenvolvido a partir da técnica convencional de ensaio de dureza. Esse método consiste em aplicar uma força progressiva e realizar descarregamentos parciais intermediários, até que a profundidade máxima requerida (força máxima) seja alcançada e o indentador seja completamente recolhido. Durante o ensaio, é fundamental coletar continuamente os valores de força e profundidade de indentação, que são grandezas essenciais para a obtenção das propriedades (HAGGAG; NANSTAD; BRASKI, 1989).

Os resultados da análise da curva de escoamento (força versus deslocamento) obtidos por meio do ensaio de indentação são utilizados para calcular os valores incrementais de tensão e deformação, empregando uma combinação de teorias da elasticidade e plasticidade. Esses resultados permitem a determinação de parâmetros como o limite de escoamento, limite de resistência, coeficiente de resistência, expoente de encruamento, dureza e tenacidade à fratura, entre outros.

A Figura 2.4 ilustra uma curva característica gerada por um ensaio de macroindentação. Observa-se que os gráficos de força em função da profundidade geralmente se assemelham a segmentos que podem ser aproximados usando polinômios lineares de primeiro grau.

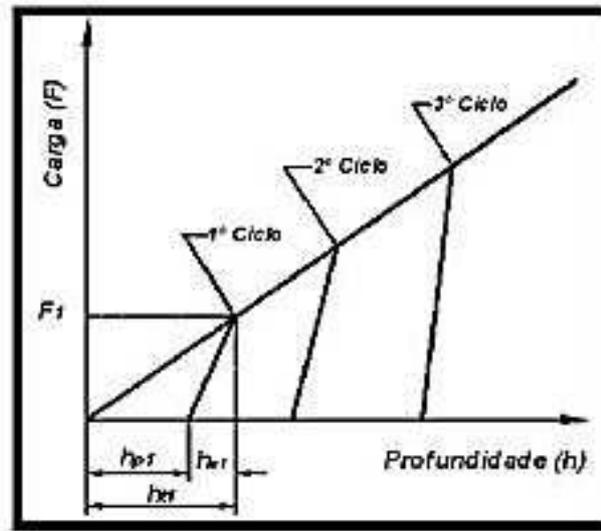


Figura 2.4 - Curva característica de um ensaio de macroindentação instrumentada, adaptada de (HAGGAG, 1993).

A partir dessas curvas, são obtidos os valores da força máxima (F) e das profundidades plástica (h_p), elástica (h_e) e máxima (h_t) de cada ciclo, como ilustrado na Figura 2.5. Esses dados são utilizados para a determinação das propriedades mecânicas do material ensaiado, conforme equacionamentos propostos pelas técnicas de Haggag et al (1989) e Kwon et al (2000).

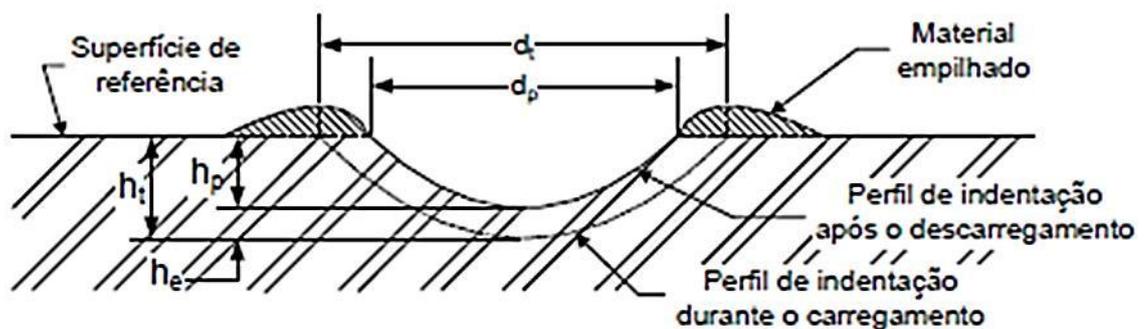


Figura 2.5 - Perfil t pico da indentação quando se utiliza um penetrador esférico, adaptada de (HAGGAG, 1993).

A abordagem desenvolvida por Haggag et al (1989)   baseada em constantes e relações semi-empíricas, que são dependentes da classe de material que está sendo analisada. No entanto, esse método não considera os efeitos da deformação superficial causada pelo indentador (como o empilhamento ou afundamento), e apesar dos esforç os da equipe proponente, ainda não existe uma norma que a regulamente. Em contrapartida, a

técnica proposta por Kwon et al (2000) usa parâmetros de contato para avaliar as propriedades de tração, sem depender de constantes específicas para cada tipo de material. Além disso, o método de Kwon leva em consideração os efeitos do afundamento e empilhamento plástico ao redor do indentador, servindo como base para a elaboração da norma ISO/TR 29381 (ISO, 2008), que trata sobre esse tipo de ensaio (SOUSA, 2011).

Por conseguinte, ressalta-se que a principal vantagem do ensaio de macroindentação instrumentada na avaliação de propriedades mecânicas, comparado aos métodos convencionais, reside no fato de que, a macroindentação é considerada uma técnica não destrutiva. Ademais, ela pode ser conduzida diretamente na estrutura objeto de análise sem interromper o processo operacional, como, em dutos em funcionamento para transporte de óleo ou gás. A única exigência é que a superfície a ser ensaiada seja lisa, preferencialmente polida e livre de oxidação. E quando realizado em laboratório, as amostras para este ensaio podem ser bastante pequenas, permitindo a execução de vários ensaios em um único exemplar, desde que a zona plástica de uma indentação não coincida com a zona plástica de uma indentação vizinha (TRICHY, 2005).

2.3. Equipamentos de ensaio de indentação instrumentada

2.3.1. PropinSitu II

Em 2001, o Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), em colaboração com o Laboratório de Engenharia Biomédica e Automática (BIOLAB) da Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT), também da UFU, e com o apoio financeiro da FINEP e da PETROBRAS, iniciou um projeto chamado "Avaliação de Propriedades Mecânicas in situ Através de Macroindentação Instrumentada". Como resultado desse projeto, foi desenvolvido um equipamento portátil chamado PropinSitu I (CARDOSO, 2004), projetado para avaliar as propriedades mecânicas de materiais metálicos no local. Posteriormente, uma segunda versão do equipamento, o PropinSitu 2, foi desenvolvida, trazendo melhorias em relação à versão anterior (FRANCO, 2007; SOUSA, 2011), versão essa que foi utilizada para realização dos ensaios no presente trabalho.

O dispositivo de macroindentação instrumentada portátil denominado PropinSitu II, pode ser dividido em três unidades principais: 1) estrutura mecânica, que envolve os elementos de apoio e fixação dos diversos dispositivos, além do sistema de aplicação da força de ensaio; (2) instrumentação e *hardware* de controle, constituído pelo aparato eletrônico

necessário para medir a força e o deslocamento, controle do ensaio e transmissão de dados; e (3) *software* de controle, aquisição e processamento dos dados, responsável pelo gerenciamento de todo o ensaio, incluindo o processo de indentação, monitoração, coleta de dados e processamento destes para obtenção das propriedades mecânicas (SOUSA, 2011):

O sistema de aplicação de força é composto por um motor de passo conectado a um redutor, o qual tem a função de acionar um atuador linear, que, por sua vez, move o penetrador em direção à superfície de ensaio. No extremo do atuador, está conectada uma célula de carga, seguida pelo porta-penetrador. Conforme explicado por Souza (2011), o projeto foi concebido para aplicar uma força máxima de 5 kN, limitada pela capacidade da célula de carga, com um deslocamento do atuador de 0,1 μm e uma velocidade de deslocamento variando de 0,76 mm/min a 1487 mm/min.

Ainda segundo Souza (2011), o *software* de controle, aquisição e processamento de dados foi desenvolvido em LabView® e é composto por duas unidades principais: 1) Ensaio, encarregado de controlar o deslocamento do penetrador e adquirir os dados de força e deslocamento. Esta unidade supervisiona o processo completo de ensaio, coleta e armazenamento de dados, incluindo o posicionamento do indentador por meio do deslocamento da mesa X; 2) Análise, responsável pelo tratamento dos dados do ensaio e pela obtenção das propriedades mecânicas. Esta unidade executa o processamento necessário para calcular as propriedades mecânicas do material ensaiado. No PropinSitu 2 foram implementados o método de Haggag et al (1989) e o de Kwon et al (2000) para cálculo de propriedades.

A Figura 2.6 oferece uma visão do equipamento construído. Na imagem, é possível observar a base destinada aos ensaios laboratoriais, além de detalhes da estrutura do indentador, da célula de carga e do sensor de deslocamento.

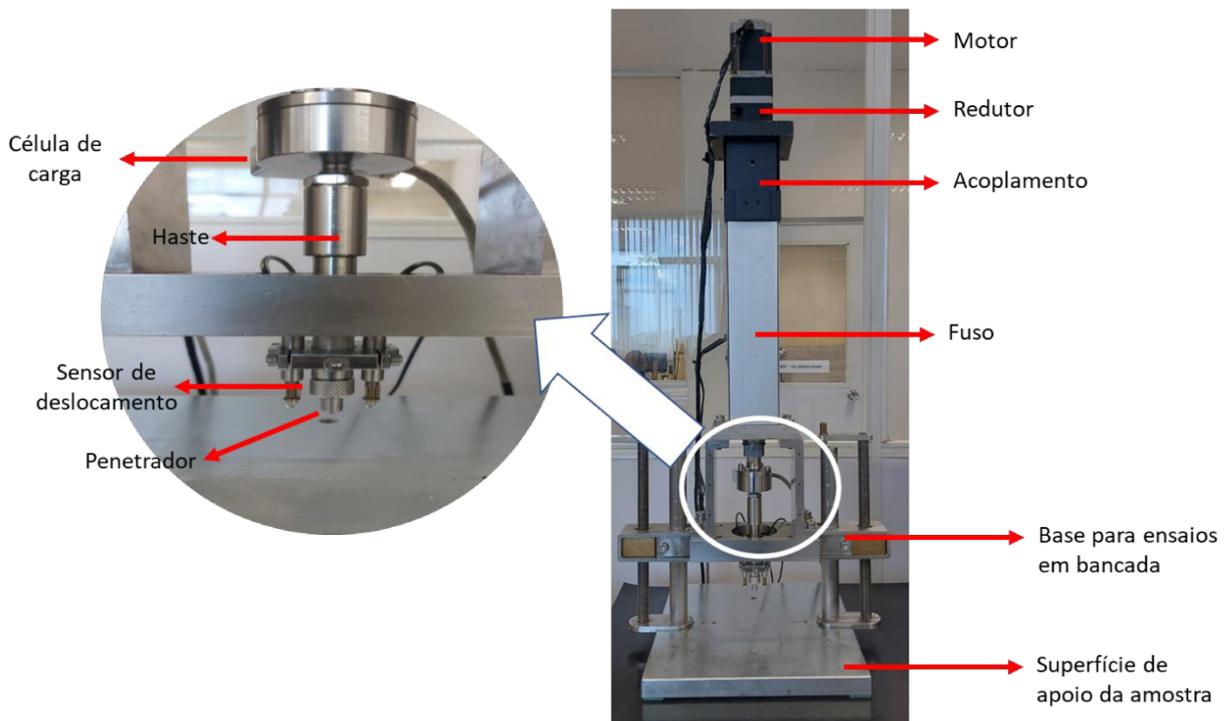


Figura 2.6 – Equipamento de indentação instrumentada PropinSitu II

2.3.2. Stress-Strain Microprobe® (SSM-M1000™)

Certas empresas oferecem comercialmente equipamentos projetados para realizar macroindentação *in situ* para a determinação de propriedades mecânicas, como o caso da empresa norte-americana ABI® Integrity Services. Entre os produtos disponíveis, a empresa desenvolveu o modelo Stress-Strain Microprobe® (SSM-M1000™), do qual há uma unidade no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) (Figura 2.7).



Figura 2.7 – Dispositivo de indentação *in situ* SSM-M1000™

O SSM-M1000™ é uma versão em tamanho reduzido (portátil) destinada a conduzir ensaios à temperatura ambiente (25 °C) em estruturas metálicas localizadas em campo, sendo o seu sistema alimentado por meio de um conjunto portátil de baterias. Este equipamento permite realizar ensaios não destrutivos e fornece resultados imediatos após a conclusão deste, com uma força máxima de indentação de 4,5 kN e com um deslocamento do atuador com resolução de 0,002 μm . Quando se trata de dutos e vasos de pressão, bases magnéticas elétricas são utilizadas para montar o equipamento na superfície. O controle abrangente do dispositivo é gerenciado por um computador portátil, juntamente com o *software* do sistema. Esse dispositivo foi desenvolvido com base no modelo delineado por Haggag, conforme mencionado previamente.

O pacote de *software* fornecido pela ABI® Integrity Services para a execução dos ensaios foi criado utilizando a linguagem de programação visual LabView® e inclui diversas funcionalidades, tais como: controle preciso do sistema de indentação, operando em malha fechada tanto para força quanto para deslocamento; monitoramento rigoroso para evitar que o deslocamento máximo e a força máxima ultrapassem os limites operacionais, prevenindo danos aos sensores (célula de carga, transdutor de deslocamento), ao corpo de prova, à estrutura de ensaio e ao indentador; gestão completa dos movimentos do motor, incluindo

descarregamento total ao final do ensaio; capacidade de aquisição de dados a uma taxa máxima de 500 valores por segundo; apresentação gráfica em tempo real dos sinais de força e deslocamento durante o ensaio; e a opção de imprimir ou salvar eletronicamente os resultados do ensaio.

2.4. Flexibilidade Elástica

A determinação da flexibilidade elástica da máquina, incluindo sua incerteza, é essencial para garantir resultados confiáveis nos ensaios de indentação instrumentada, especialmente ao avaliar materiais duros na faixa macro, isto é, entre 2 N e 30 kN (ULLNER et al., 2010). A flexibilidade elástica da máquina de ensaio refere-se à deformação elástica que ocorre na estrutura de aplicação de força e no penetrador enquanto uma força é aplicada ao sistema.

Oliver e Pharr (1992) afirmam que a precisão na determinação da flexibilidade elástica do sistema de força desempenha um papel crucial em um ensaio de indentação instrumentada, uma vez que os deslocamentos medidos são a combinação dos deslocamentos no corpo de prova e no sistema de força. Portanto, para uma determinação precisa dos deslocamentos no corpo de prova, é fundamental ter um conhecimento preciso da flexibilidade elástica do sistema de força, o que assume uma importância ainda maior em casos de indentações significativamente grandes realizadas em materiais de elevado módulo de elasticidade, nos quais o deslocamento do sistema de força pode representar uma proporção considerável do deslocamento total. Ademais, segundo Freitas (2018), a compensação da flexibilidade elástica do equipamento também é muito importante em ensaios de micro e nanoindentação, onde as profundidades de indentação são extremamente pequenas. Nesses casos, se a flexibilidade elástica do equipamento não for conhecida e compensada, ela pode exercer uma influência significativa nos resultados obtidos.

A flexibilidade elástica do equipamento (C_m), quando somada à flexibilidade elástica da amostra (C_{real}), resulta na flexibilidade elástica total medida (C_t), conforme definido na Equação 2.2 (OLIVER; PHARR, 1992).

$$C_t = C_m + C_{real} \quad (2.2)$$

A rigidez de contato é analisada modelando o sistema como uma série de molas, avaliando a flexibilidade elástica da estrutura, C_m e a rigidez do corpo de prova, S , como

mostra a Figura 2.8. Ademais, nota-se que a aplicação da força pelo penetrador resulta em deslocamentos tanto no corpo de prova quanto na estrutura de força. Dessa forma, é crucial identificar e subtrair a flexibilidade elástica da estrutura do deslocamento total do penetrador para considerar corretamente a deformação do corpo de prova.

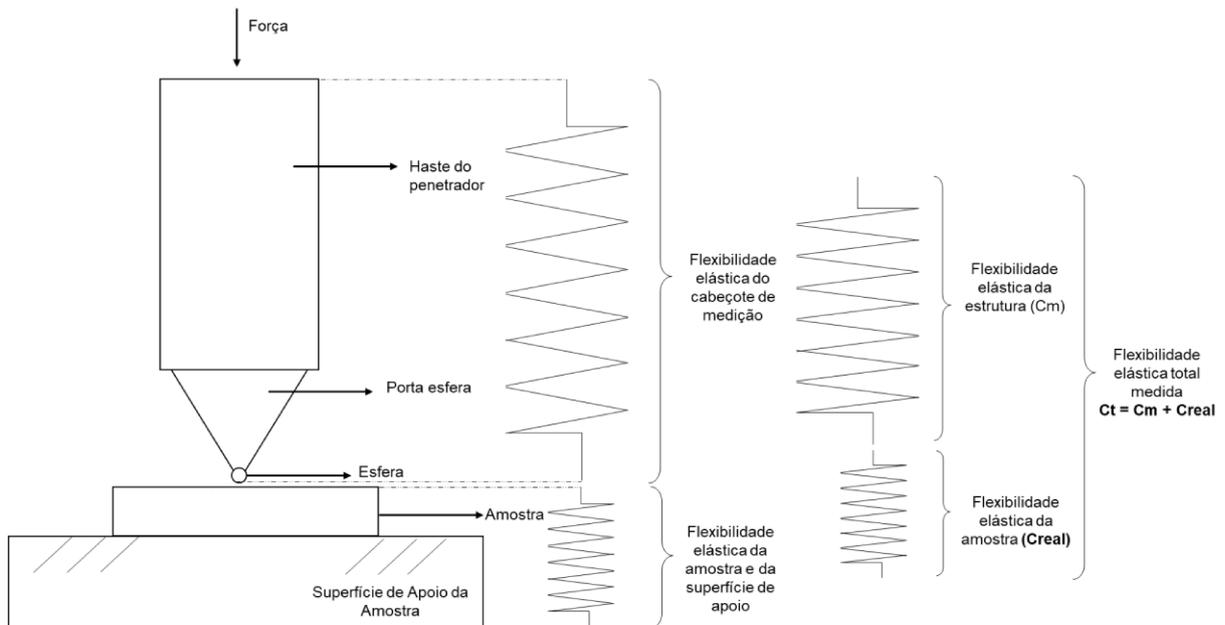


Figura 2.8 – Esquema representativo da flexibilidade elástica de uma máquina de ensaio de indentação instrumentada (adaptada de Kholkhujaev et al., 2023).

A Figura 2.9 ilustra algumas fontes de incerteza decorrentes de um ensaio de indentação instrumentada. Como a curva de indentação é um polinômio de segunda ordem na faixa macro, a determinação do ponto zero (ponto de contato) pode levar a uma fonte importante de incerteza. Também, a flexibilidade elástica da máquina afeta não apenas a profundidade da indentação, mas também a inclinação inicial do descarregamento. Somado a isso, problemas adicionais relacionados ao cálculo da inclinação inicial do descarregamento (escolha específica da função de ajuste e faixa de ajuste) devem ser observados (ULLNER, 2004).

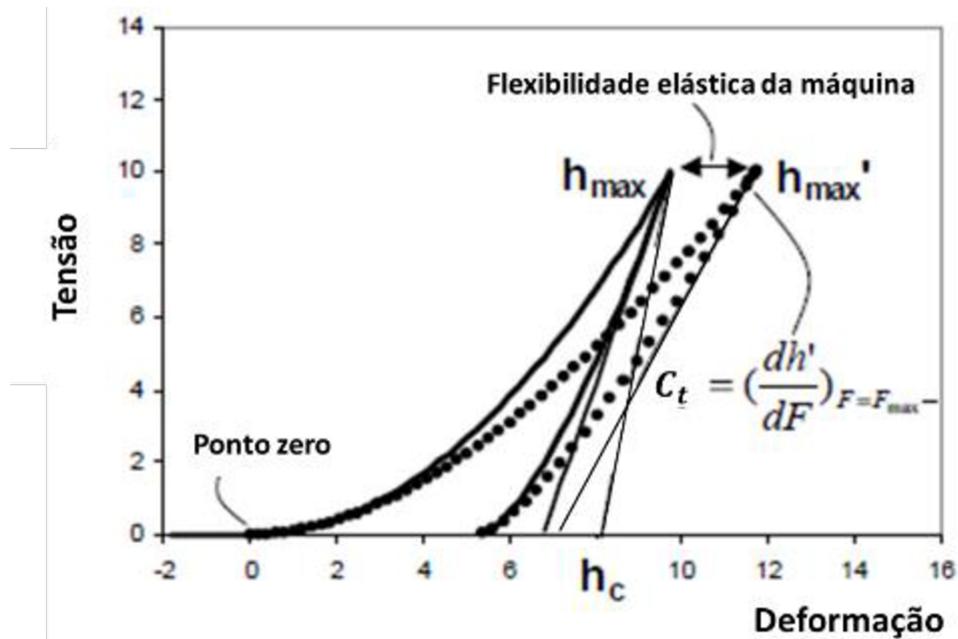


Figura 2.9 – Fontes de incerteza do ensaio de indentação instrumentado (adaptada de Ullner, 2004).

Ainda na Figura 2.9   possível visualizar que a inclinação da curva de descarregamento no ponto de aplicação da forç a máxima no ensaio (associada ao início do descarregamento do último ciclo de carregamento/d Descarregamento) representa a rigidez do contato S , conforme definido na Equa o 2.3. Portanto, durante o contato elástico, a flexibilidade elástica da amostra   determinada pela Equa o 2.4 e   equivalente ao inverso da rigidez do contato (OLIVER; PHARR, 1992).

$$S = \frac{dF}{dh} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_r \sqrt{A} \quad (2.3)$$

$$C_{real} = \frac{1}{S} \quad (2.4)$$

Na Equa o 2.3, E_r representa o módulo de elasticidade reduzido do material, calculado conforme a Equa o 2.5, enquanto A denota a área de contato da indentação (OLIVER; PHARR, 1992).

$$\frac{1}{E_r} = \frac{(1-\nu_a^2)}{E_a} + \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} \quad (2.5)$$

Kholkhujaev et al. (2023) afirmam que a rigidez total de contato, S_m , pode ser calculada como a derivada da curva de indentação no início do processo de descarregamento. Assim, como a flexibilidade elástica total é equivalente ao inverso da a rigidez total de contato, é possível mensurá-la por meio da Equação 2.6.

$$\frac{1}{s_m} = C_t = C_m + C_{real} = C_m + \frac{1}{s} \quad (2.6)$$

2.5. Metodologias para avaliação da flexibilidade elástica em máquinas de macroindentação instrumentada

A literatura e as normas apresentam várias técnicas de calibração para a flexibilidade elástica da estrutura. No entanto, existem várias limitações e, apesar de diferentes métodos de calibração estarem disponíveis, as abordagens mais pertinentes são aquelas documentadas na ISO 14577-2 (ISO, 2015) e na revisão de Ullner et al (2010), as quais, serão comentadas a seguir.

2.5.1. Método ISO 14577-2

A norma ISO 14577-2 (ISO, 2015) no Anexo D descreve diversos métodos de calibração para a flexibilidade elástica da estrutura. No entanto, apesar de a norma abranger todas as faixas de aplicação do ensaio de indentação instrumentada, todos os métodos de calibração foram desenvolvidos para aplicações na escala nano, e os exemplos e diretrizes de boas práticas da norma se limitam a essa escala. Por extrapolação, apenas o segundo método do Anexo D da ISO 14577-2 (ISO, 2015) é aplicável na escala macro. Esse método requer a realização de uma série de indentações em diferentes forças, cujos resultados são analisados por meio de um procedimento iterativo, encerrando-se quando há convergência. Além disso, é necessário utilizar um bloco de referência calibrado em termos de módulo de Young, E , ou módulo de indentação, EIT . Estudos anteriores destacaram as limitações dessa abordagem devido à alta sensibilidade à configuração experimental, como a faixa de força calibrada, o número de níveis de força e a replicação. Quando aplicado à escala macro, esse método resulta em viés, frequentemente atribuído aos efeitos da plasticidade da indentação, como os efeitos de borda. No entanto, esses efeitos de borda, que geralmente se manifestam como acumulação ou afundamento, são insignificantes na escala macro e afetam principalmente aplicações nas escalas micro e nano (KHOLKHUJAEV et al., 2023)

Ademais, a norma ISO 14577 (ISO, 2015) estipula que a função da área do indentador deve ser conhecida para determinar a flexibilidade elástica da máquina, exigindo o uso de métodos iterativos na faixa nano e micro. No entanto, em casos em que a profundidade de indentação ultrapassa os 6 μm , a flexibilidade elástica das máquinas de ensaio de macroindentação instrumentada pode ser determinada sem o conhecimento da área do indentador. Além disso, o módulo de indentação e a dureza podem ser considerados independentes da força de ensaio na faixa macro.

2.5.2. Método de regressão linear da função C_t vs. $F^{-0,5}$

De acordo com Ullner et al. (2010), a flexibilidade elástica é uma fonte crucial de incerteza na faixa macro. Sendo assim, estudos detalhados sobre a medição e análise da flexibilidade elástica da máquina são essenciais para garantir resultados confiáveis. Além disso, afirma que a profundidade de indentação deve ser corrigida mesmo para máquinas bem projetadas se a força de ensaio ultrapassar 2,5 N e a incerteza na flexibilidade elástica medida deve ser inferior a 1 nm/N para garantir resultados confiáveis em ensaios de indentação com forças superiores a 250 N. Por último, evidencia que não é possível determinar a flexibilidade elástica com precisão melhor do que cerca de 1 nm/N.

Embora não esteja incluído na norma, o método de regressão linear da função C_t vs. $F^{-0,5}$ é revisado em Ullner et al. (2010), e utilizado em trabalhos científicos pertinentes.

Descrevendo outro método (Módulo de indentação constante), Ullner et al. (2010) apresenta que nos experimentos de indentação, são aplicadas diferentes forças F . Assim, as inclinações de descarregamento iniciais determinadas, representados por $S(F)$, resultam em um conjunto de módulos de indentação $E_{IT}(F)$. Ao considerar que a flexibilidade elástica total medida $C_t = \frac{1}{S}$ é a soma da flexibilidade elástica da máquina com o valor real C_{real} para o cálculo de E_{IT} , pode-se determinar a flexibilidade elástica da máquina C_m , variando seu valor e utilizando critérios para se aproximar de $E_{IT}(F) = \text{constante}$ (por exemplo, critérios de Gauss ou desaparecimento do declive da regressão $E_{IT}(F)$). É importante observar que a determinação da inclinação inicial de descarregamento pode ser realizada de várias maneiras, como por meio de regressão linear dentro da faixa selecionada ou ajuste de curvas não lineares e cálculo da derivada em F_{max} .

Segundo Ullner et al. (2010) o método de regressão linear da função C_t vs. $F^{-0,5}$ também se baseia nas definições do módulo de indentação E_{IT} .

$$E_{IT} = (1 - \nu_s^2) \left(\frac{1}{E_r} - \frac{(1 - \nu_i^2)}{E_i} \right)^{-1} \quad (2.7)$$

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi} \left(\frac{dF}{dh} \right)_{F_{\max}}}{2 \sqrt{A_p(h_c)}} \quad (2.8)$$

$$h_c = h_{\max} - \frac{0,75 F_{\max}}{\left(\frac{dF}{dh} \right)} \quad (2.9)$$

$$H_{IT} = \frac{F_{\max}}{A_p(h_c)} \quad (2.10)$$

Nas equações de 2.7 a 2.10, ν_s é o coeficiente de Poisson do material da amostra; ν_i é o coeficiente de Poisson do material do indentador; E_r é o módulo de elasticidade da amostra; E_i é o módulo de elasticidade do indentador; h_c é a profundidade de penetração; eA_p é a área de contato projetada entre indentador e amostra;

Ao combinar as Equações 2.8 e 2.10 com a flexibilidade elástica total $C_t = C_m + C_{\text{real}}$, obtém-se a Equação 2.11:

$$\left(\frac{dh}{dF} \right) F_{\max} = C_m + \frac{\sqrt{\pi}}{2E_r} \frac{\sqrt{H_{IT}}}{\sqrt{F_{\max}}} \quad (2.11)$$

Mais uma vez, os ensaios de indentação são realizados com diferentes forças F . A aplicação de uma regressão linear à flexibilidade elástica C_t em relação a $F^{-0,5}$ proporciona a flexibilidade elástica da máquina necessária, C_m , para forças infinitamente altas ($F^{-0,5} = 0$).

Este método depende dos pressupostos $\frac{H_{IT}}{E_i^2} = \text{constante}$ e $C_m = \text{constante}$, e a função de extrapolação usada deve ser precisa. É importante notar que essas premissas são validadas na prática se o gráfico C_t vs. $F^{-0,5}$ puder ser ajustado com uma linha reta. Espera-se que a condição $\frac{H_{IT}}{E_i^2} = \text{constante}$ seja melhor atendida em forças mais elevadas na região de extrapolação.

Uma vez que a Equação 2.8 é independente da geometria do indentador, a determinação da flexibilidade elástica da máquina de acordo com a Equação 2.11 é também possível para indentadores esféricos em caso que a dureza for definida pelo quociente entre a força e a área de contato.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para a realização do trabalho. Desta forma, o capítulo é dividido nos seguintes tópicos: seleção e caracterização dos corpos de prova e ensaios de macroindentação instrumentada.

3.1. Seleção e caracterização dos corpos de prova

Os materiais selecionados para os ensaios de indentação foram aços utilizados nas indústrias do setor de óleo e gás, sendo eles: AISI 4340 em diferentes valores de dureza (28 HRC, 32 HRC e 40 HRC), AISI 4130M e AISI 4137M. Um corpo de prova foi fabricado a partir de cada material utilizando o processo de usinagem por eletroerosão a fio (\varnothing 0,18 mm), modelo FW2U, do fabricante AgieCharmiles. Estas possuem geometria simples, retangular de 60 mm de altura, 25 mm de largura e espessura igual à da chapa, 10 mm. Os cinco corpos de prova após a realização das indentações são mostrados na Figura 3.1.

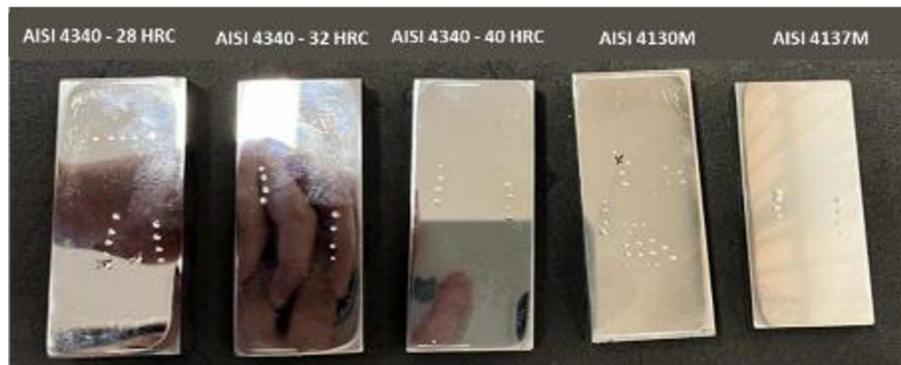


Figura 3.1 – Corpos de prova após a realização dos ensaios de macroindentação instrumentada.

No que diz respeito à preparação da superfície para os ensaios de macroindentação, foi realizado o processo de retificação nas faces inferior e superior de cada corpo de prova. Esse procedimento assegurou a planeza e a paralelismo entre as faces, sendo essencial para evitar qualquer movimentação dos corpos de prova durante os ensaios, especialmente no início da aplicação da força.

Antes de realizar os ensaios, as superfícies foram cuidadosamente lixadas passando pelos estágios de 220, 600 e 1200 *mesh*, e polidas utilizando pastas de diamante com granulometrias médias de 9, 6, 3 e 1 μm . Posteriormente, os corpos de prova foram limpos com água deionizada e acetona e armazenados em um dessecador a vácuo, a fim de reduzir a presença de óxidos em sua superfície.

3.2. Ensaios de macroindentação instrumentada

Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) utilizando duas diferentes máquinas de ensaios: PropinSitu II e SSM-M1000™, previamente citadas nos itens 2.3.1 e 2.3.2 deste trabalho.

As indentações foram efetuadas nos corpos de prova utilizando um penetrador esférico de WC-Co de 1,5 mm de diâmetro em ambos os equipamentos. Os seguintes valores para módulo de elasticidade foram introduzidos no *software* de cálculo das propriedades mecânicas dos aços analisados em ambos equipamentos:

- Módulo de elasticidade do material dos corpos de prova (aço): 210 GPa;
- Módulo de elasticidade dos penetradores de WC-Co: 645 GPa;

Os valores adotados para os módulos de elasticidade tanto para os corpos de prova quanto para os penetradores foram definidos basendo-se nos valores empregados nos

trabalhos de Ramos Neto et al. (2004) e Franco (2007) sobre macroindentação instrumentada, os quais buscaram avaliar as propriedades mecânicas de tração de aços-carbono ou de baixa liga.

Em relação aos corpos de prova, como a diferença entre os módulos de elasticidade dos aços carbono e de baixa liga é relativamente pequena, já que essa propriedade depende principalmente das forças de ligação entre os átomos de ferro e é pouco influenciada pela presença de elementos de liga optou-se por utilizar um valor de 210 GPa para os corpos de prova empregados neste estudo (NICOLOSI, 2015). Por último, em relação ao penetrador de WC-Co, Franco (2007) afirma que a porcentagem de cobalto nas esferas de WC-Co é de 6% em peso, o que está dentro da faixa exigida pela norma ASTM E10 (2012) para ensaios de dureza Brinell (entre 5 e 7 %), e proporciona um módulo de elasticidade próximo de 645 GPa.

Para cada corpo de prova, realizou-se quatro indentações a uma temperatura de 25 °C cada uma contemplando um ciclo completo de carregamento e descarregamento, sendo que o critério de parada da força aplicada sobre o corpo de prova foi um valor da profundidade de indentação (h_c) pré-determinado. Isso significa que, quando o valor de profundidade de indentação pré-determinado era atingido, iniciava-se o processo de descarregamento. Esses valores foram definidos como 10 %, 15 %, 20 %, e 24 % do raio do penetrador esférico e são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Valores limites de profundidade de indentação.

Indentação	Porcentagem do raio do penetrador (%)	Profundidade h_c (µm)
1	10	75,0
2	15	112,5
3	20	150,0
4	24	180,0

A Figura 3.2 ilustra um fluxograma dos procedimentos realizados para determinar a flexibilidade elástica dos equipamentos de indentação instrumentada PropinSitu II e SSM-M1000™. Toda a análise dos dados gerados pelos ensaios e cálculos requeridos foram realizados no *software* Microsoft Excel.

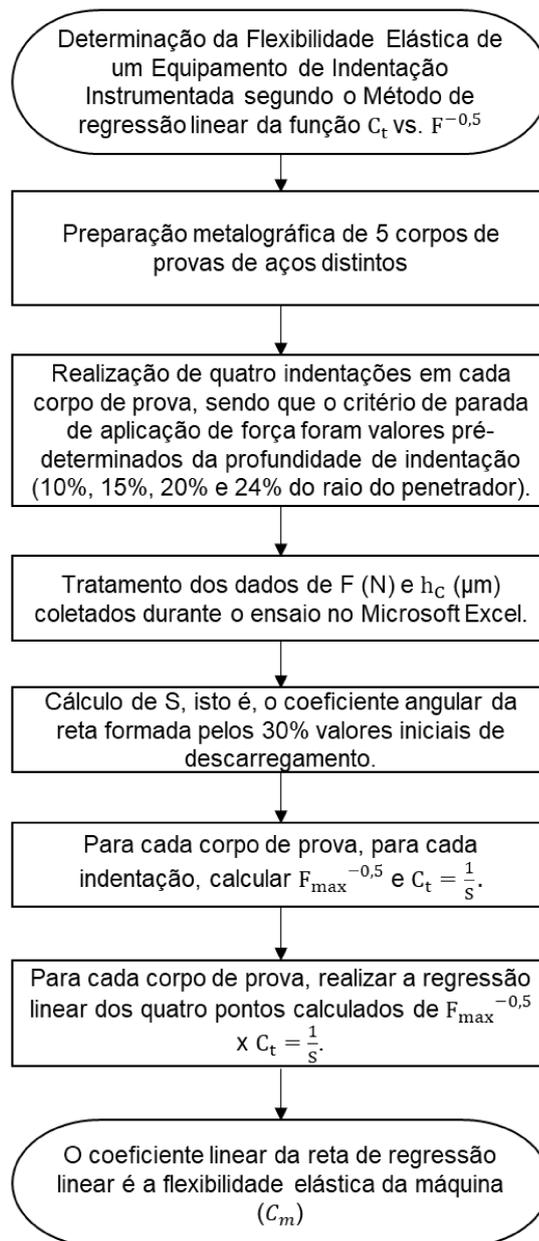


Figura 3.2 – Fluxograma do procedimento aplicado para determinação da flexibilidade elástica dos equipamentos de indentação instrumentada PropinSitu II e SSM-M1000™

Para o cálculo do parâmetro S , utilizou-se apenas os 30 % valores iniciais da curva de descarregamento uma vez que Doerner e Nix (2004) presumem que esta porção é linear. Assim, foi efetuada uma regressão linear utilizando o método dos mínimos quadrados para ajustar uma reta aos primeiros 30 % dos pontos de dados de descarregamento. A inclinação inversa desta curva é a flexibilidade elástica total C_t , e a interceptação no eixo de profundidade é a profundidade de contato h_c (Figura 3.3). Os 70 % restantes dos pontos de dados foram desconsiderados.

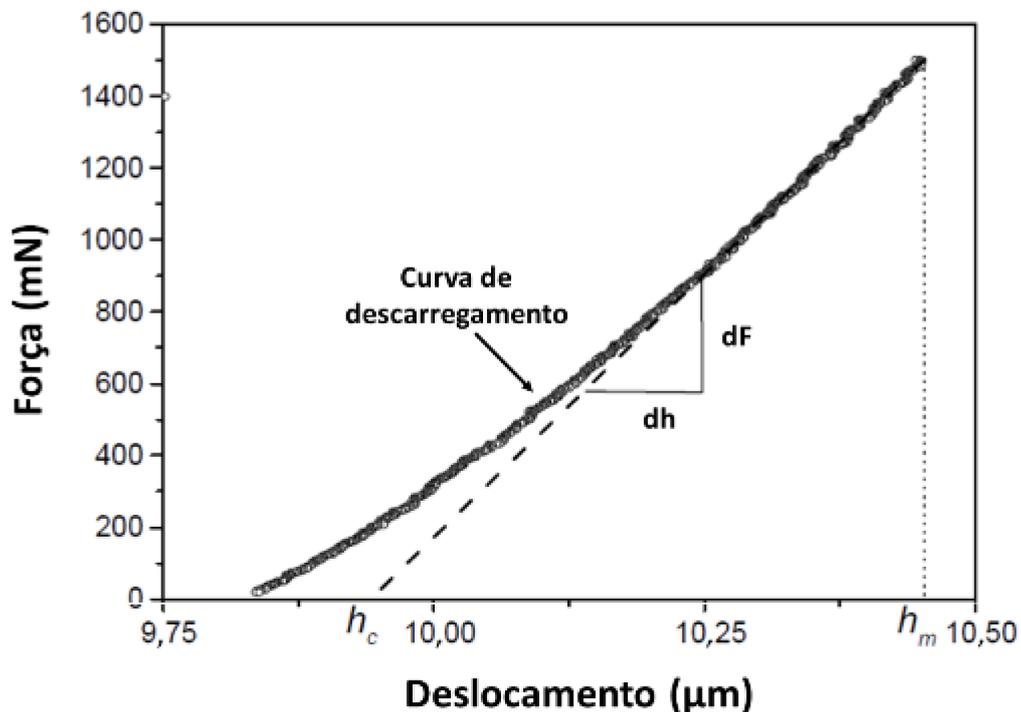


Figura 3.3 - Análise Doerner-Nix de curvas de descarregamento (adaptada de Doerner e Nix, 2004).

A fim de avaliar a linearidade dos primeiros 30 % dos valores de descarregamento, calcula-se o coeficiente de determinação “ R^2 ”. O coeficiente de determinação é uma medida estatística que representa a proporção da variabilidade na variável dependente que é explicada pelas variáveis independentes em um modelo de regressão. O R^2 varia de 0 a 1, em que quanto maior o R^2 , mais explicativo é o modelo linear, isto é, melhor o modelo representa os dados observados.

Ademais, é importante verificar a adequabilidade do modelo de regressão linear, ou seja, o modelo é adequado se comprovada a independência dos resíduos entre si e em relação às variáveis independentes. No modelo, os resíduos devem estar distribuídos normalmente, com média aritmética igual a zero, ou próxima a zero e a variância σ^2 dos resíduos devem permanecer constante no intervalo tratado (VALDÉS, 1999).

Segundo Valdés (1999), para avaliar se os resíduos são independentes e se sua variância é constante, é necessário analisar os gráficos dos resíduos em função a cada variável independente (x), dos resíduos com função dos valores previstos (y) e dos resíduos como função do tempo. Esses gráficos ajudam a identificar possíveis problemas no modelo, como falta de linearidade e a presença de valores discrepantes, também conhecidos como *outliers*. Assim, em gráficos em que se identifica *outliers*, esses valores devem ser excluídos da análise sempre que possível, pois podem comprometer a adequação do modelo. Os

outliers geralmente surgem devido a erros experimentais ou variações nas condições de ensaio. Por fim, a normalidade dos resíduos pode ser verificada por meio de um histograma ou de um gráfico de probabilidade normal.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Para um melhor entendimento estes foram divididos em dois tópicos: resultados dos ensaios no equipamento PropinSitu II e resultados dos ensaios no equipamento SSM-M1000™.

4.1. Resultados dos ensaios no equipamento PropinSitu II

As curvas de Força (N) versus Deslocamento (μm) resultantes do ensaio de macroindentação no equipamento PropinSitu II em cada corpo de prova são apresentadas nas Figura 4.1 a 4.5. Cada gráfico contempla as quatro indentações, sendo que cada cor representa uma indentação diferente, ou seja, a curva alaranjada representa a indentação referente à profundidade de 10 % do raio do indentador; a curva azul representa a de 15 %; a curva cinza representa a de 20 % e, por último, a curva amarela representa a de 24 %.

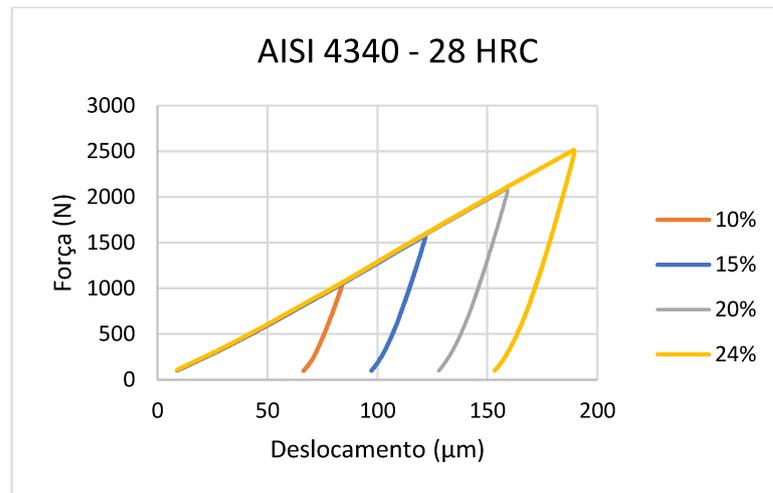


Figura 4.1 – Curva Força vs Deslocamento do aço AISI 4340 - 28 HRC.

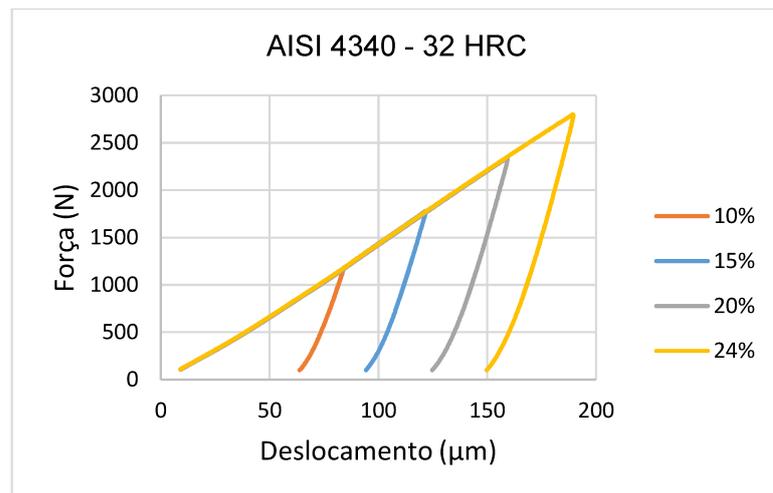


Figura 4.2 – Curva Força vs Deslocamento do aço AISI 4340 - 32 HRC.

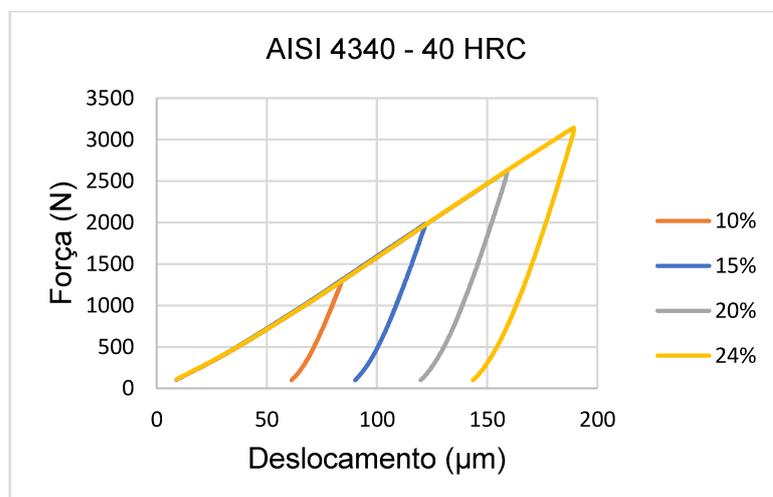


Figura 4.3 - Curva Força vs Deslocamento do aço AISI 4340 - 40 HRC.

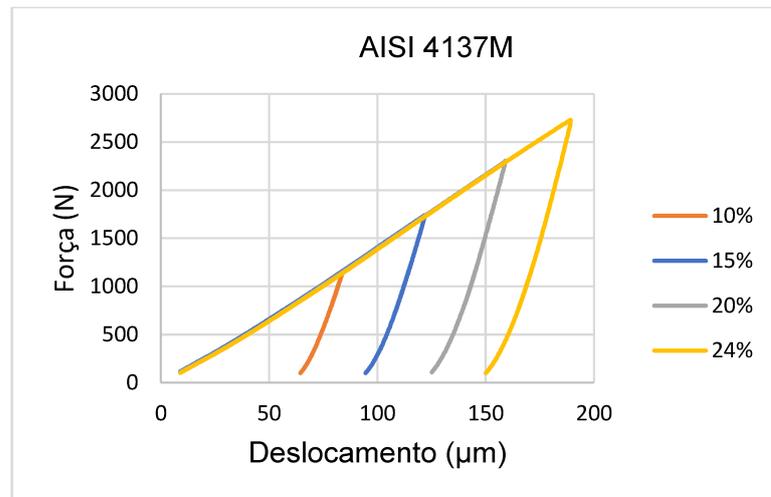


Figura 4.4 - Curva Força vs Deslocamento do aço AISI 4137M.

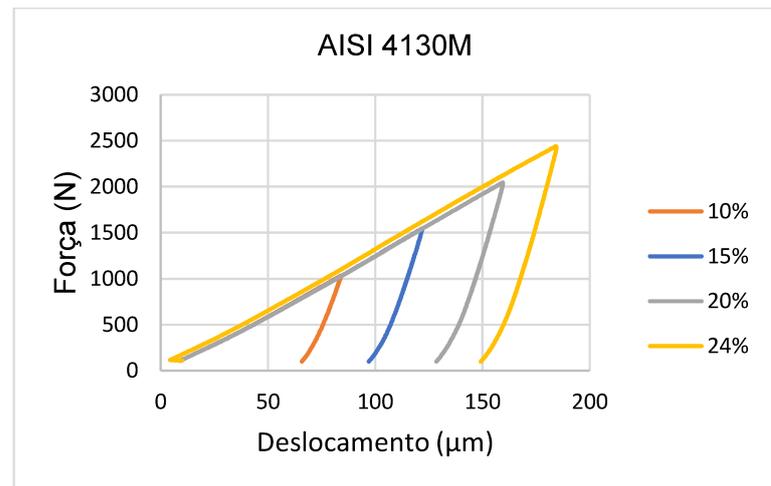


Figura 4.5 - Curva Força vs Deslocamento do aço AISI 4130M.

As curvas de Força versus Deslocamento obtidas durante o ensaio de indentação no equipamento PropinSitu exibem o comportamento típico esperado de um ensaio de indentação e possuem características semelhantes aos obtidos por equipamentos de ensaios de indentação instrumentada encontrados na literatura.

Os resultados obtidos para a flexibilidade total (C_t) e para a força máxima ($F_{\max}^{-0,5}$) em cada corpo de prova são apresentados nas Tabelas 4.1 a 4.5.

Tabela 4.1 – Resultados de C_t e $F_{max}^{-0,5}$ obtidos no ensaio com aço AISI 4340 - 28 HRC

Indentação	C_t ($\mu\text{m/N}$)	$F_{max}^{-0,5}$ ($\text{N}^{-0,5}$)
1	0,014	0,031
2	0,013	0,025
3	0,012	0,022
4	0,012	0,020

Tabela 4.2 – Resultados de C_t e $F_{max}^{-0,5}$ obtidos no ensaio com aço AISI 4340 - 32 HRC

Indentação	C_t ($\mu\text{m/N}$)	$F_{max}^{-0,5}$ ($\text{N}^{-0,5}$)
1	0,014	0,029
2	0,013	0,024
3	0,012	0,021
4	0,012	0,019

Tabela 4.3 – Resultados de C_t e $F_{max}^{-0,5}$ obtidos no ensaio com aço AISI 4340 - 40 HRC

Indentação	C_t ($\mu\text{m/N}$)	$F_{max}^{-0,5}$ ($\text{N}^{-0,5}$)
1	0,015	0,028
2	0,014	0,022
3	0,012	0,020
4	0,012	0,018

Tabela 4.4 – Resultados de C_t e $F_{max}^{-0,5}$ obtidos no ensaio com aço AISI 4137M

Indentação	C_t ($\mu\text{m/N}$)	$F_{max}^{-0,5}$ ($\text{N}^{-0,5}$)
1	0,015	0,029
2	0,013	0,024
3	0,012	0,021
4	0,012	0,019

Tabela 4.5 – Resultados de C_t e $F_{max}^{-0,5}$ obtidos no ensaio com aço AISI 4130M

Indentação	C_t ($\mu\text{m/N}$)	$F_{max}^{-0,5}$ ($\text{N}^{-0,5}$)
1	0,015	0,031
2	0,013	0,025
3	0,012	0,022
4	0,012	0,020

Os valores apresentados nas Tabelas 4.1, a 4.5 foram utilizados para encontrar a equação de regressão que melhor descreve a relação entre as variáveis de interesse. Por fim, conforme o método de regressão linear da função C_t vs. $F^{-0,5}$ descrito por Ullner et al. (2010), a flexibilidade elástica da máquina é dada pelo coeficiente linear da equação da reta, isto é, C_m é o ponto onde a linha de regressão intercepta o eixo vertical.

A Figura 4.6 ilustra o gráfico C_t vs. $F^{-0,5}$ para cada corpo de prova e suas retas de regressão linear.

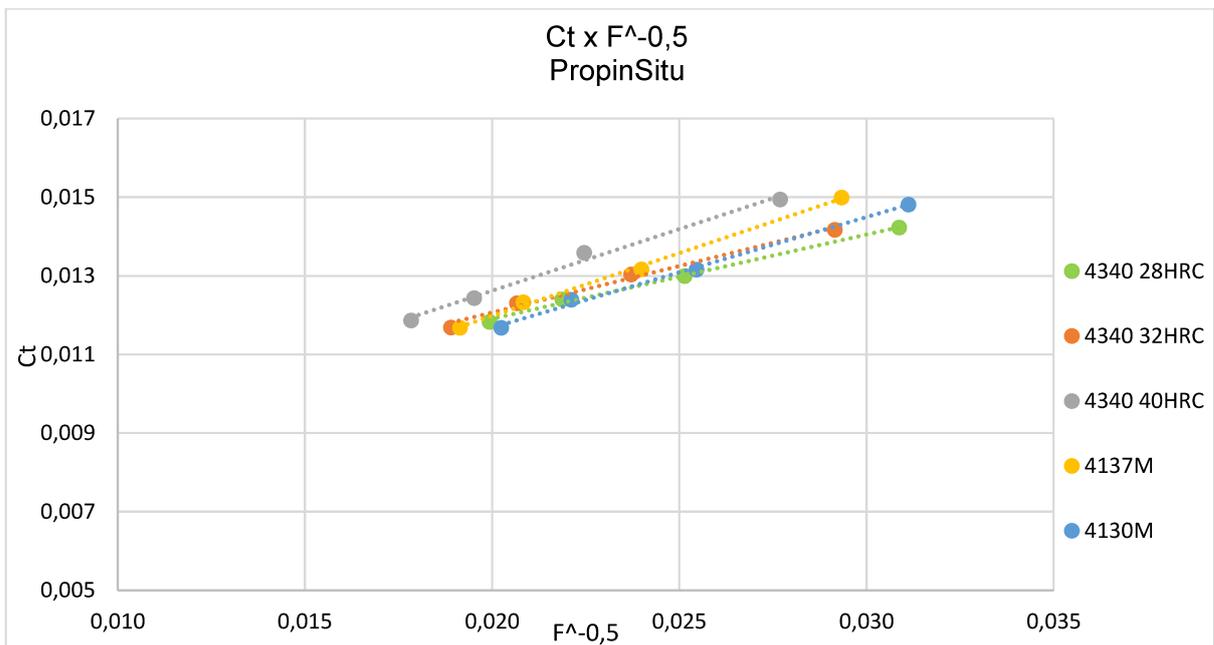


Figura 4.6 - Retas de regressão linear dos valores de C_t vs. $F^{-0,5}$ obtidos nos ensaios de indentação no equipamento PropinSitu II.

A Tabela 4.6 mostra as equações da reta e seu respectivo coeficiente de determinação obtidos para cada corpo de prova. Nesse cenário, é possível visualizar os valores de flexibilidade elástica do equipamento de indentação para cada ensaio, uma vez que ele é representado pelo coeficiente linear da reta.

Tabela 4.6 – Equações da reta e coeficiente de determinação obtidos para cada corpo de prova

Corpo de Prova	Equação da reta	R ²
AISI 4340 28 HRC	$y = 0,21420943x + 0,00762305$	0,995
AISI 4340 28 HRC	$y = 0,23652773x + 0,00733565$	0,990
AISI 4340 28 HRC	$y = 0,31353466x + 0,00634963$	0,990
AISI 4137M	$y = 0,31972855x + 0,00558400$	0,997
AISI 4130M	$y = 0,28133854x + 0,00605388$	0,995

Assim sendo, é possível concluir que a flexibilidade elástica do equipamento PropinSitu II pode ser dada pela média dos valores individuais obtidos para cada corpo de prova, o que resulta em $C_m = 0,006589242 \mu\text{m}/\text{N}$, isto é, $C_m \sim 6,6 \text{ nm}/\text{N}$.

4.2. Resultados dos ensaios no equipamento SSM-M1000™

As curvas de Força (N) versus Deslocamento (μm) resultantes do ensaio de macroindentação no equipamento SSM-M1000™ em cada corpo de prova são apresentadas pelas Figura 4.7 a 4.11 e, sendo que cada cor representa uma indentação diferente, a qual considera o carregamento e descarregamento.

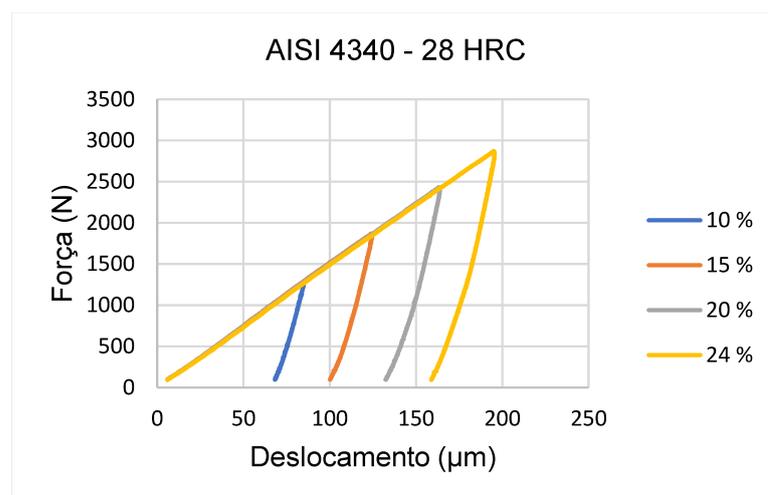


Figura 4.7 - Curva Força vs Deslocamento do aço AISI 4340 - 28 HRC.

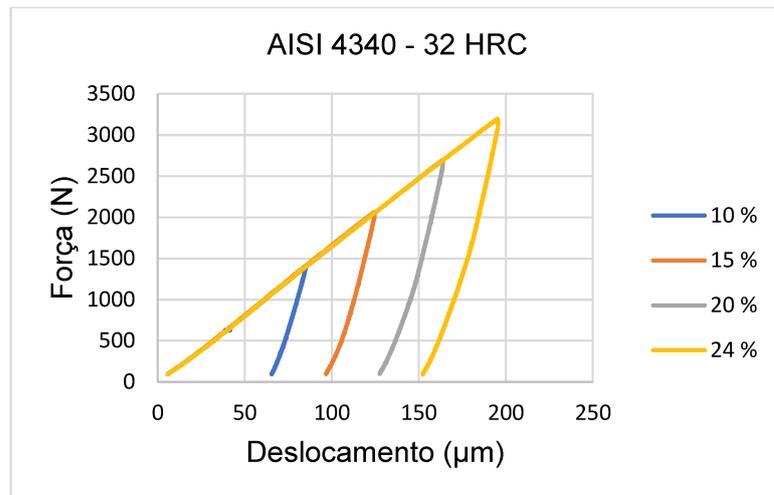


Figura 4.8 - Curva Força vs Deslocamento do aço AISI 4340 – 32 HRC.

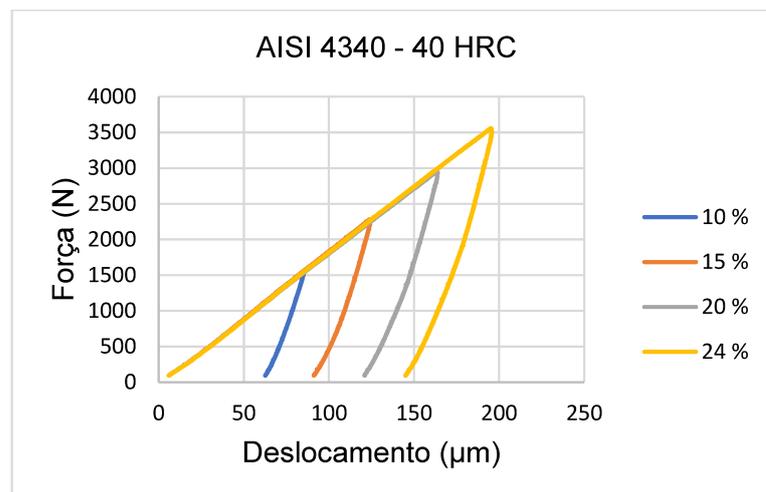


Figura 4.9 - Curva Força vs Deslocamento do aço AISI 4340 – 40 HRC.

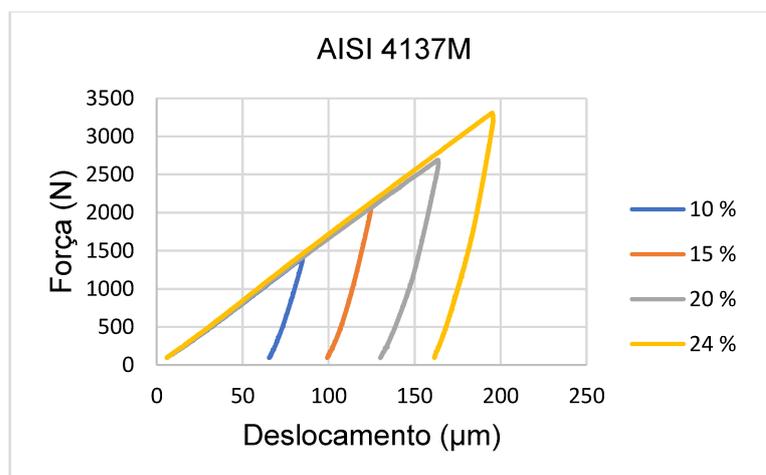


Figura 4.10 - Curva Força vs Deslocamento do aço AISI 4137M.

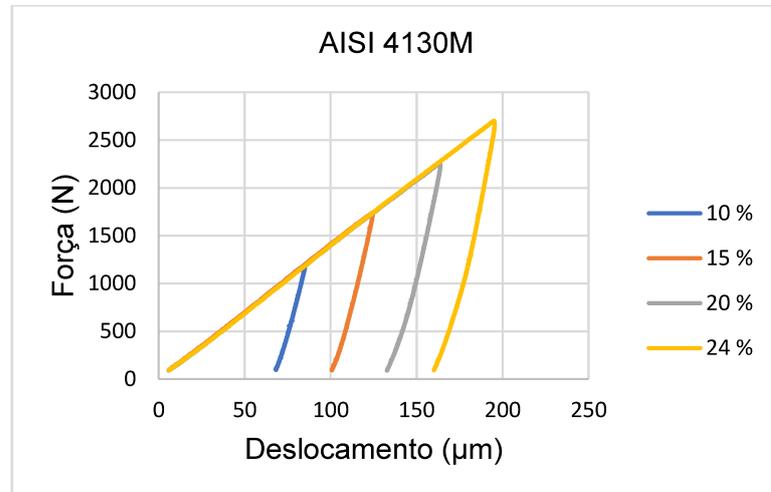


Figura 4.11 - Curva Força vs Deslocamento do aço AISI 4130M.

As curvas de Força versus Deslocamento obtidas durante o ensaio de indentação no equipamento SSM-M1000™ também exibiram o comportamento típico esperado de um ensaio de indentação e possuem características semelhantes aos obtidos por outros equipamentos encontrados na literatura.

Os resultados obtidos para a flexibilidade total (C_t) e para a força máxima ($F_{max}^{-0,5}$) em cada corpo de prova são apresentados nas Tabelas 4.7 a 4.11.

Tabela 4.7 – Resultados de C_t e $F_{max}^{-0,5}$ obtidos no ensaio com aço AISI 4340 - 28 HRC

Indentação	C_t ($\mu\text{m}/\text{N}$)	$F_{max}^{-0,5}$ ($\text{N}^{-0,5}$)
1	0,012	0,028
2	0,011	0,023
3	0,010	0,020
4	0,010	0,019

Tabela 4.8 – Resultados de C_t e $F_{max}^{-0,5}$ obtidos no ensaio com aço AISI 4340 - 32 HRC

Indentação	C_t ($\mu\text{m}/\text{N}$)	$F_{max}^{-0,5}$ ($\text{N}^{-0,5}$)
1	0,013	0,027
2	0,011	0,022
3	0,011	0,019
4	0,010	0,018

Tabela 4.9 – Resultados de C_t e $F_{max}^{-0,5}$ obtidos no ensaio com aço AISI 4340 - 40 HRC

Indentação	C_t ($\mu\text{m/N}$)	$F_{max}^{-0,5}$ ($\text{N}^{-0,5}$)
1	0,013	0,026
2	0,012	0,021
3	0,011	0,018
4	0,011	0,017

Tabela 4.10 – Resultados de C_t e $F_{max}^{-0,5}$ obtidos no ensaio com aço AISI 4137M

Indentação	C_t ($\mu\text{m/N}$)	$F_{max}^{-0,5}$ ($\text{N}^{-0,5}$)
1	0,013	0,027
2	0,010	0,022
3	0,010	0,019
4	0,008	0,017

Tabela 4.11 – Resultados de C_t e $F_{max}^{-0,5}$ obtidos no ensaio com aço AISI 4130M

Indentação	C_t ($\mu\text{m/N}$)	$F_{max}^{-0,5}$ ($\text{N}^{-0,5}$)
1	0,014	0,029
2	0,012	0,024
3	0,011	0,021
4	0,010	0,019

A Figura 4.12 ilustra o gráfico C_t vs. $F^{-0,5}$ para cada corpo de prova e suas retas de regressão linear.

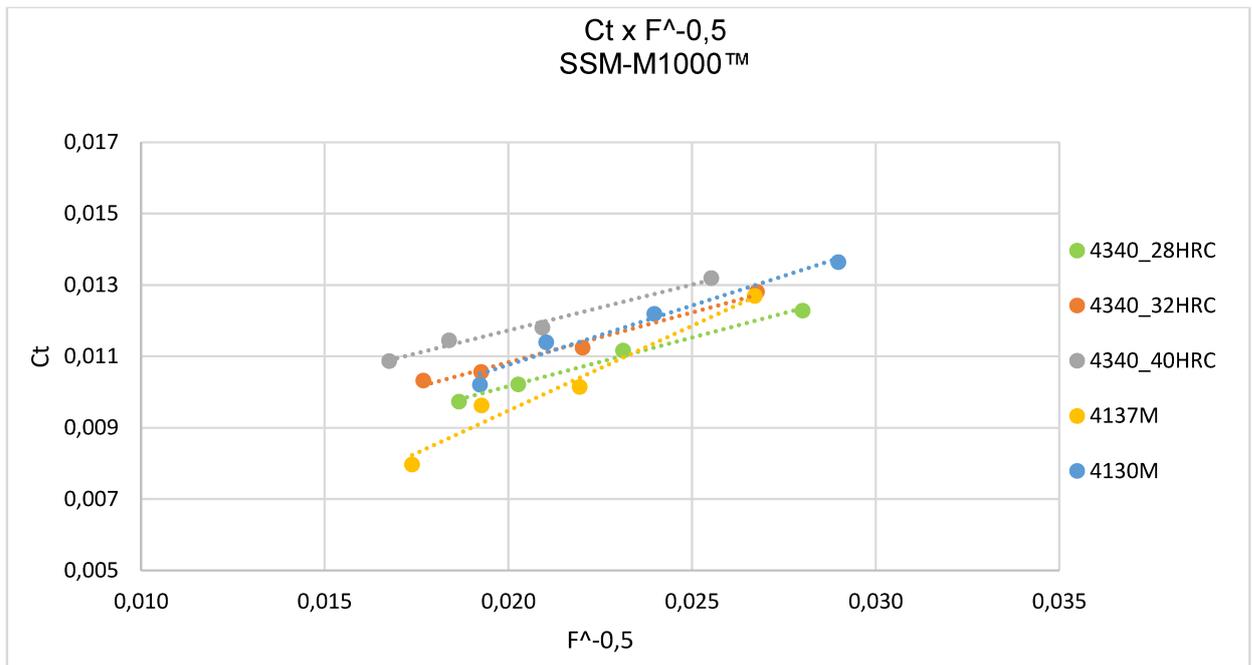


Figura 4.12 - Retas de regressão linear dos valores de C_t e $F^{-0,5}$ obtidos nos ensaios de indentação no equipamento SSM-M1000™.

A Tabela 4.12 mostra as equações da reta e seu respectivo coeficiente de determinação obtidos para cada corpo de prova. Assim sendo, é possível visualizar os valores de flexibilidade elástica do equipamento de indentação para cada ensaio, uma vez que ele é representado pelo coeficiente linear da reta.

Tabela 4.12 – Equações da reta e coeficiente de determinação obtidos para cada corpo de prova.

Corpo de Prova	Equação da reta	R ²
AISI 4340 28 HRC	$y = 0,27317465x + 0,00469892$	0,991
AISI 4340 28 HRC	$y = 0,27920592x + 0,00524934$	0,986
AISI 4340 28 HRC	$y = 0,25660747x + 0,00659511$	0,983
AISI 4137M	$y = 0,47565936x - 0,00003554$	0,967
AISI 4130M	$y = 0,33249680x + 0,00411236$	0,968

Assim sendo, é possível concluir a flexibilidade elástica do equipamento SSM-M1000™, pode ser dada pela média dos valores individuais obtidos para cada corpo de prova, o que resulta em $C_m = 0,004124038 \mu\text{m/N}$, isto é, $C_m \sim 4,1 \text{ nm/N}$.

4.3. Análise estatística dos resultados obtidos

Na Figura 4.13 são mostrados os valores médios de flexibilidade elástica para ambos os equipamentos. As barras de erros representam o desvio padrão para um nível de confiança de 68,27 %. A partir da Figura 4.13 se conclui que os valores obtidos para flexibilidade elástica dos equipamentos PropinSitu II e SSM-M1000™ foram, respectivamente, $C_m \sim 6,6$ nm/N e $C_m \sim 4,1$ nm/N. Dessa forma, avaliando esses resultados, é possível dizer que, uma vez que a flexibilidade elástica é inversamente proporcional à rigidez, o equipamento SSM-M1000™ apresenta maior rigidez em comparação com o PropinSitu II. O valor médio de C_m obtido para este equipamento é 37 % menor para o equipamento SSM-M1000™. Uma das razões para essa característica se dá pela montagem mais simplificada da estrutura do equipamento e pela robustez das travas de fixação.

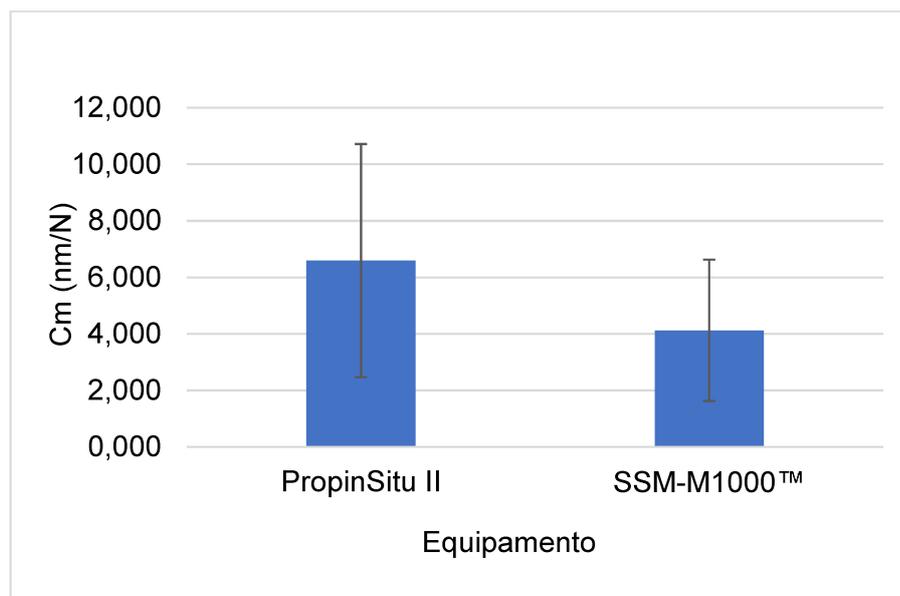


Figura 4.13 - Valores médios de flexibilidade elástica para ambos os equipamentos. As barras de erros representam o desvio padrão para um nível de confiança de 68,27 %.

Entretanto, o valor da flexibilidade elástica do equipamento SSM-M1000™ apresenta menor repetibilidade que aquele obtido para o PropinSitu II. O valor do desvio padrão associado foi aproximadamente três vezes maior. Este fato denota também uma maior incerteza padrão associada à flexibilidade elástica deste equipamento (1,4 nm/N). Para o PropinSitu II a incerteza padrão assumiu 0,5 nm/N. Este fato sugere que se um fator de correção for aplicado para mitigar o efeito da flexibilidade elástica, essa correção será mais eficiente para o PropinSitu II.

A normalidade dos dados foi avaliada utilizando o teste de Shapiro-Wilk, o qual resultou em um valor de $p > 0,05$ (0,63725) indicando que os dados possuem distribuição normal.

A análise de Variância (ANOVA), *one-way* ANOVA, foi efetuada por meio do *software* STATISTICA® para identificar se os valores de flexibilidade elástica obtidos para ambos os equipamentos apresentam diferenças estatisticamente significativas. Neste caso o fator avaliado é o equipamento o qual assume dois níveis, quais sejam: (- 1) para o PropinSitu II e (+1) para o SSM-M1000™. Na Tabela 4.13 é mostrado o resumo dos resultados da ANOVA.

Tabela 4.13 – Resultados de ANOVA para os valores individuais da flexibilidade elástica

Efeito	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	Valor F	Valor p
Intercepto	0,005808	1	0,005808	3475,713	0,000000
equipamento	0,000032	1	0,000032	19,389	0,000084
Erro	0,000064	38	0,000002		
Total	0,005904	40,000000	0,005842		

A partir da Tabela 4.13 se conclui, com 95 % de confiabilidade, que os valores de flexibilidade elástica obtidos para ambos os equipamentos são estatisticamente diferentes (valor $p < 0,05$) quando considerados todos os valores individuais dos ensaios realizados para cada material. O gráfico de probabilidade normal dos resíduos, Figura 4.14, exibe um comportamento aproximadamente normal dos valores dos resíduos.

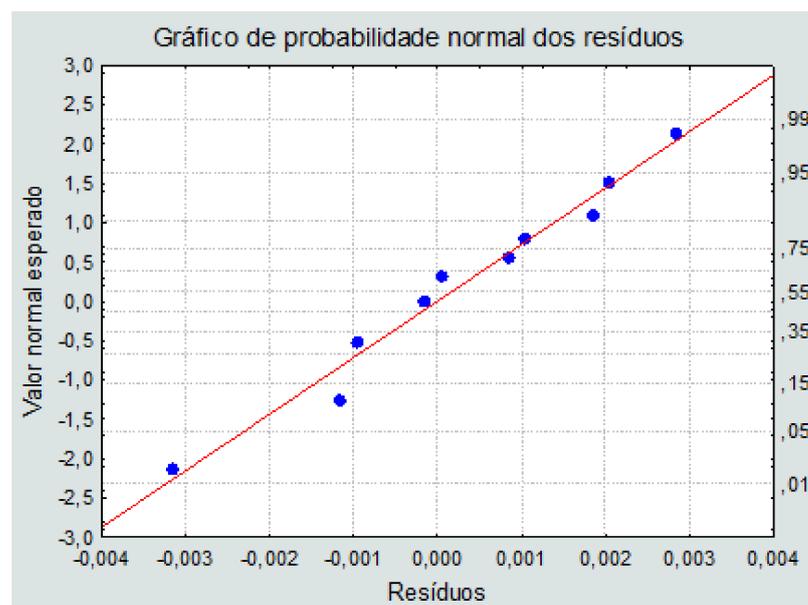


Figura 4.14 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos.

Os gráficos dos resíduos da regressão para os cinco materiais ensaiados nos equipamentos PropinSitu II e SSM-M1000™ são mostrados na Figura 4.15 e 4.16, respectivamente. Nestas figuras se observa que os resíduos estão distribuídos aleatoriamente em torno de zero.

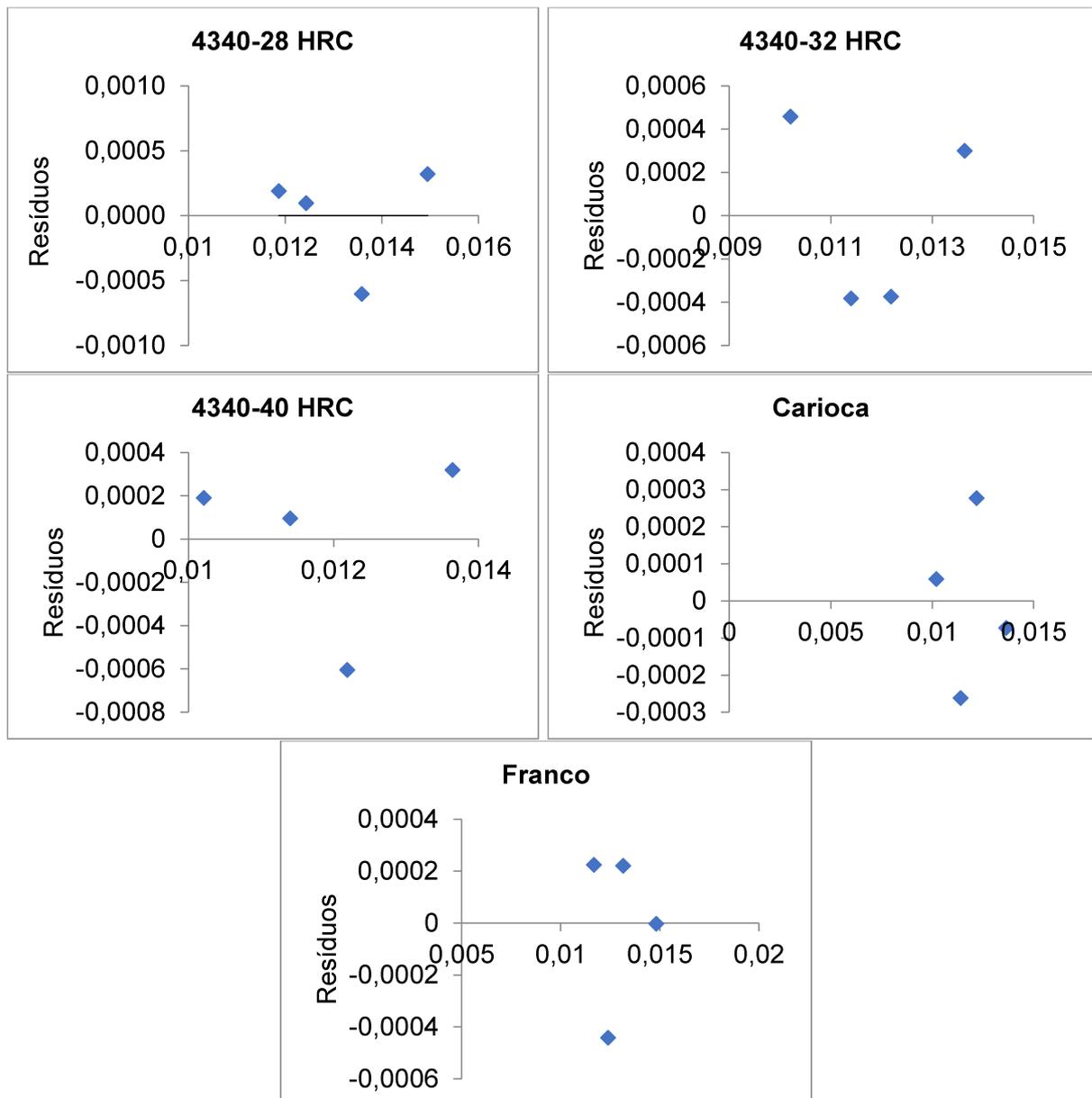


Figura 4.15 - Gráficos dos resíduos da regressão para os cinco materiais ensaiados no Propinsitu II.

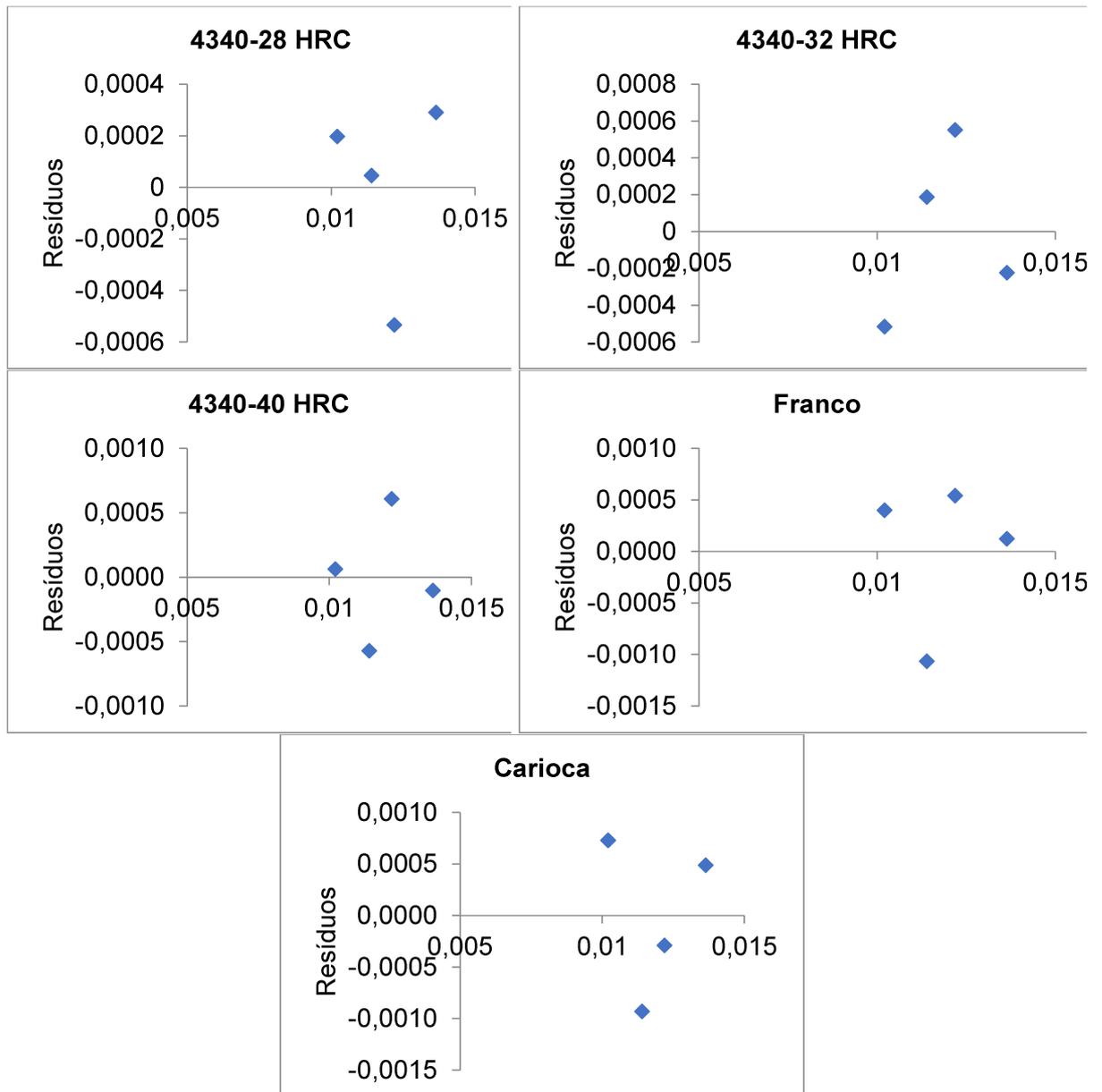


Figura 4.16 - Gráficos dos resíduos para os cinco materiais ensaiados no SSM-M1000™.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES

Esse trabalho determinou as constantes de correção da flexibilidade elástica de dois equipamentos de ensaios de macroindentação instrumentada. A seguir são apresentadas as principais conclusões desse trabalho:

- Os valores obtidos para flexibilidade elástica dos equipamentos PropinSitu II e SSM-M1000™ foram, respectivamente, $C_m \sim 6,6$ nm/N e $C_m \sim 4,1$ nm/N. Dessa forma, avaliando esses resultados, é possível dizer que, uma vez que a flexibilidade elástica é inversamente proporcional à rigidez, o equipamento SSM-M1000™ apresenta maior rigidez em comparação com o PropinSitu II. Uma das razões para essa característica se dá pela montagem mais simplificada da estrutura do equipamento e pela robustez das travas de fixação.
- Analisando estatisticamente os valores obtidos por ambos equipamentos, nota-se que o conjunto de dados do equipamento SSM-M1000™ apresentou maior desvio padrão que o conjunto de dados do equipamento PropinSitu II. Isso significa que o conjunto amostral do primeiro apresenta maior variabilidade em relação ao segundo, isto é, há uma maior dispersão dos dados em torno da média. Além disso, indica que o conjunto amostral do PropinSitu I apresentou maior homogeneidade em relação ao SSM-M1000™.
- Fatores externos podem ter exercido influência sob a variabilidade dos dados coletados durante os ensaios, como desgaste dos penetradores, temperatura, vibrações do ambiente e rugosidade do corpo de prova.

- A flexibilidade elástica do equipamento SSM-M1000™ apresentou menor repetibilidade quando comparada com aquela obtida para o PropinSitu II. O valor do desvio padrão associado foi aproximadamente três vezes maior. Este fato denota também uma maior incerteza padrão associada à flexibilidade elástica e uma menor eficiência se um fator de correção for aplicado para mitigar o efeito da flexibilidade elástica.
- A análise de variância (ANOVA) mostrou, com 95 % de confiabilidade, que os valores de flexibilidade elástica obtidos para ambos os equipamentos são estatisticamente diferentes quando considerados todos os valores individuais dos ensaios realizados para cada material.
- Uma vez que os valores de flexibilidade elástica obtidos foram baixos, o que conseqüentemente indica que a parcela de deformação dos equipamentos também é baixa durante a execução de ensaios, pode-se afirmar que a flexibilidade elástica não influencia significativamente resultados dos ensaios de indentação instrumentada nos equipamentos avaliados. Portanto, não há comprometimento significativo dos resultados obtidos nesse equipamento devido a flexibilidade elástica da estrutura deles.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892: Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.
- CALLISTER JR., William D. **Ciência e Engenharia De Materiais: Uma Introdução**. Quinta Edição. Rio de Janeiro - RJ: LTC Editora, 2002.
- CARDOSO, F. C. **Desenvolvimento do Sistema de Instrumentação e Controle de um Macroindentador Portátil para Avaliação de Propriedades Mecânicas de Dutos**. 2004, 99 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.
- DOENER, M. F.; NIX, W. D. **A Method for Interpreting the Data from Depth-Sensing Indentation Instruments**. Journal of Materials Research, 1, 1986.
- FRANCO, S. D. **Avaliação de Propriedades Mecânicas in Situ Através do Macroindentação Instrumentada - Parte II**. Uberlândia: Laboratório de Tribologia e Materiais - FEMEC - Universidade Federal de Uberlândia. 2007.
- FREITAS, M. A. F. M. **Avaliação de propriedades mecânicas de aços via macroindentação instrumentada e inteligência artificial**. 2018. 210 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG.
- HAGGAG, F. M. **In-situ Nondestructive Measurements of key Mechanical Properties of Oil and Gas Pipelines**. American Society of Mechanical Engineers - PVP, 2001.
- HAGGAG, F. M.; NANSTAD, R. K.; BRASKI, D. N. **Structural Integrity Evaluation Based on an Innovative Field Indentation Microprobe**. American Society of Mechanical Engineers – PVP, Vol. 170, 1989.
- HAGGAG, F. M.; NANSTAD, R. K.; HUTTON, J. T.; THOMAS, D. L.; SWAIN, R. L. **Use of Automated Ball Indentation Testing to Measure Flow Properties and Estimate Fracture Toughness in Metallic Materials**. American Society for Testing and Materials, ASTM 1092, Philadelphia, 1990.

ISO/TR 29381. **Metallic Materials - Measurement of Mechanical Properties by an Instrumented Indentation Test Indentation Tensile Properties.** International Organization for Standardization, 2008.

ISO 14577-1. **Metallic Materials - Instrumented Indentation Test for Hardness and Materials Parameters - Part 1: Test Method.** International Organization for Standardization, 2002.

ISO 14577. ISO 14577: **Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters — Part 2: Verification and calibration of testing machines.** International Organization for Standardization, 2015

KANIA, R.; RUSSELL, A.; GAO, **M. Advanced Indentation Systems for Tensile Properties Evaluation of In-Service Pipelines.** NACE - Corrosion 2004, N° 04170, Nova Orleans, USA, 2004.

KHOLKHUJAEV, J; MACULOTTI, G; GENTA, G; GALETTO, M. **Calibration of machine platform nonlinearity in Instrumented Indentation Test in the macro range.** Precision Engineering, 2023.

NETO, F. F. R.; FRANCO, S. D. **Avaliação de Propriedades Mecânica em Dutos Através de Ensaios de Macroindentação Instrumentada.** Anais do V Seminário de Pós-Graduação da Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, 2002.

NICOLOSI, E. R. **Avaliação de Métodos Analíticos para Determinação de Propriedades Mecânicas de Aços Via Ensaio de Macroindentação Instrumentada.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

OLIVER, W.C., PHARR, G. M. **An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments.** Journal of Materials Research, 1992.

RAMOS NETO, F. F.; FILHO, B. G. S.; PAES, M. T. P.; FRANCO, S. D. **Gradientes de Propriedades Mecânicas em Estruturas de Condução de Petróleo.** In: 14° Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.

SOUSA, J. V. ***Desenvolvimento de um Sistema de Controle e Interfaceamento para um Macroindentador Portátil para Avaliação de Propriedades Mecânicas de Dutos Baseado em Tecnologias DSP e Wireless.*** 2011, 137p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

TRICHY, G. ***Development of the ball indentation test to evaluate mechanical properties of nanostructured materials.*** Master of Science Thesis, Materials Science and Engineering, North Carolina State University, Raleigh, 2005.

ULLNER, C. ***Critical Points in ISO 14577 Part 2 and 3 Considering the Uncertainty in Measurement.*** Proceedings of HARDMEKO 2004, Washington DC, USA, 11-12 November, 2004.

ULLNER, C.; REIMANN, E; KOHLHOFF, H.: SUBARIC-LEITIS, A. ***Effect and Measurement of the Machine Compliance in the Macro Range of Instrumented Indentation Test.*** Measurement, 2010.

VALDES, A. R. ***Equacionamento das Componentes do erro Volumétrico em Máquinas de Medir a Três Coordenadas.*** São Carlos, 1999. 199p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.