

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

TIAGO FABRES RIBEIRO

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DOS
REVESTIMENTOS DE SUPERLIGAS A BASE DE NÍQUEL
DEPOSITADOS POR SOLDAGEM TIG, ATRAVÉS DO ENSAIO DE
ESCLEROMETRIA LINEAR**

**VITÓRIA
2014**



TIAGO FABRES RIBEIRO

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DOS
REVESTIMENTOS DE SUPERLIGAS A BASE DE NÍQUEL
DEPOSITADOS POR SOLDAGEM TIG, ATRAVÉS DO ENSAIO DE
ESCLEROMETRIA LINEAR**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Temístocles de Sousa Luz, D.Sc.

Coorientador: Flávio José da Silva, D.Sc

VITÓRIA

2014

FABRES RIBEIRO, Tiago.

Avaliação do comportamento tribológico dos revestimentos de superligas a base de níquel depositados por soldagem TIG, Inconel 625, Hastelloy C276 e Inconel 686 por ensaio de esclerometria linear – 2014. 64f.

Orientador: Temístocles de Sousa Luz

Coorientador: Flávio José da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Esclerometria Linear. 2. Superligas de Níquel. 3. Dureza ao Risco. 4. Coeficiente f_{ab} . I. FABRES RIBEIRO, Tiago. II. Universidade Federal Do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica. III. Avaliação do comportamento tribológico dos revestimentos de superligas a base de níquel depositados por soldagem TIG, através do ensaio de esclerometria linear.

TIAGO FABRES RIBEIRO

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DOS
REVESTIMENTOS DE SUPERLIGAS A BASE DE NÍQUEL
DEPOSITADOS POR SOLDAGEM TIG, ATRAVÉS DO ENSAIO DE
ESCLEROMETRIA LINEAR**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 30 de julho de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. D.Sc. Temístocles de Souza Luz
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Orientador

B. Sc. Leandro Entringer Falqueto
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Examinador

B. Sc. Nathan Fantecelle Strey
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Examinador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como universitário.

A minha mãe Fátima e ao meu pai Pedro, aos meus irmãos e familiares, que nunca mediram esforço para que eu pudesse completar mais esta etapa em minha vida. Agradeço a minha namorada que sempre me ajudou a seguir o caminho independente dos obstáculos.

À Agência Nacional do Petróleo (ANP) e ao Programa de Recursos Humanos da Petrobrás (PRH29) pela oportunidade e apoio financeiro para a realização deste trabalho

Ao Orientador D.Sc. Temístocles de Souza Luz por sua ajuda e apoio nas etapas deste trabalho.

Ao Professor e amigo D.Sc. Flávio José da Silva por ter me apresentado a proposta do trabalho e por toda ajuda que ofereceu.

Ao D. Sc. Cleiton Carvalho Silva, por ter cedido as amostras para este trabalho.

Aos engenheiros Leandro Entringer Falqueto, Matheus Aguiar e Lázaro Coutinho por todo apoio técnico nas etapas do presente trabalho.

E a todos amigos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

RESUMO

Revestimentos à base de níquel são produzidos para que metais base de menor custo possam atuar em condições extremas. Classificadas como superliga de níquel, são uma classe incomum de materiais metálicos e apresentam uma combinação excepcional de resistência mecânica a alta temperatura, dureza, e resistência à degradação em ambientes corrosivos ou oxidantes e são largamente utilizadas na indústria do petróleo. O presente trabalho tem a finalidade de fazer um estudo tribológico sobre amostras soldadas por TIG, em substrato de aço ASTM A516 Gr 60, com alimentação de arame a frio. Três tipos de superligas de níquel foram analisados: Inconel 625, Hastelloy C276 e Inconel 686. As amostras foram analisadas através de ensaios de esclerometria linear, realizados no equipamento Universal Micro Tester modelo APEX da CETR/Bruker. Os resultados foram avaliados através de perfilometria para a determinação dos valores de dureza ao risco e coeficiente f_{ab} , para cada tipo de amostra nas condições de ensaio vigentes. A literatura apresenta informações de que não existem diferenças de resistência ao desgaste abrasivo nessas amostras, mas o estudo comprova que a liga Inconel 686 apresenta resultados interessantes quando comparados os valores de dureza ao risco com a fração de precipitados formados após o último cordão de solda. Estatisticamente, a análise de variância dos valores de dureza ao risco sugere que ela é independente da carga aplicada.

Palavras-Chave: Esclerometria Linear; Superligas de Níquel; Dureza ao Risco; Coeficiente f_{ab} .

ABSTRACT

Nickel based coatings are manufactured for lower cost base metal be able to act in extreme conditions. Classified as nickel superalloy, they are a rare class of metallic materials and have exceptional mechanical combination of high temperature resistance, hardness, and resistance to degradation in oxidizing or corrosive environments and are widely used in the petroleum industry. The present work has the purpose of make a tribological study on samples welded by TIG on steel substrate ASTM A516 Gr 60 with cold wire feed. Three types of nickel superalloys were analyzed: Inconel 625, Inconel 686 and Hastelloy C276. The materials were analyzed in scratch tests, performed by the Universal Micro Tester mode APEX by CETR/Bruker. Results of the tests were analyzed through surface profiling to assess the scratch hardness numbers and the f_{ab} coefficient for each sample and test conditions. The literature provides information that there are no differences in abrasive wear these samples, but the study proves that the Inconel 686 alloy has interesting results when comparing the scratch hardness with the fraction of precipitates formed after the last weld bead. Statistically analysis of variance of the scratch hardness values suggests that it is independent of the applied load.

Keywords: Scratch Test; Nickel Superalloys, Scratch Hardness; f_{ab} coefficient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema dos micromecanismos de desgaste. Fonte: (ZUM GAHR, 1987)	18
Figura 2 - Ilustração da importância do tamanho do contato da partícula abrasiva e a região de fases duras precipitadas no desgaste abrasivo. (a) o material responde de maneira homogênea, enquanto (b) responde de forma heterogênea. Fonte: (HUTCHINGS, 1992)	20
Figura 3 - Esquema do ensaio de esclerometria linear. Fonte: (JACOBSSON et al, 1992)	21
Figura 4 – Esquema da seção transversal do sulco formado. Fonte: (Adaptado de JACOBSSON et al, 1992)	22
Figura 5 - Tipos de ensaios de esclerometria linear em equipamentos de baixa velocidade: a) passe único, b) múltiplos passes e c) trajetória circular. Fonte: (JACOBSSON et al, 1992)	22
Figura 6 - Esclerometria linear in situ. Fonte: (JACOBSSON et al, 1992)	23
Figura 7 - Equipamentos de esclerometria linear de alta velocidade, a) pêndulo e b) disco girante. Fonte: (JACOBSSON et al, 1992)	23
Figura 8 – Alguns modelos de indentadores com representação de área projetada. Fonte: (WILLIAMS, 1996)	24
Figura 9 – Seção transversal do sulco gerado, para estudo do coeficiente f_{ab} . Fonte: (ZUM GAHR, 1987)	25
Figura 10 – Desenho ilustrando a trajetória para cada tipo de tecimento aplicado. Fonte: (SILVA, 2011)	34
Figura 11 - Imagens dos precipitados. (a) Fase Laves, encontrados na liga Inconel 625. (b) Precipitados de fase P, encontrados nas ligas Inconel 625 e Hastelloy C276. Fonte: (SILVA, 2011)	36
Figura 12 – Análise comparativa de percentual de fases secundárias entre o primeiro e o último cordão de solda. Fonte: (SILVA, 2010)	37
Figura 13 – Resultados do ensaio de desgaste abrasivo roda de borracha. Fonte: (SILVA, 2011)	38
Figura 14 – Universal Micro Tester modelo APEX da CETR/Brucker. Fonte: (MARTINS, 2014)	39

Figura 15 – Analisador Tridimensional TalySurf CLI 1000 – 3D Surface profiling Systems do fabricante Taylor Hobson Precision, Laboratório de Caracterização da Superfície dos Materiais, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo	41
Figura 16 – Amostra T14, sob carga de 19N, na 1ª repetição.....	42
Figura 17 – Medida da Largura de um risco da Amostra T2, sob carga de 12N, na 1ª repetição.....	42
Figura 18 – Determinação das áreas A_v , A_1 e A_2 do risco da Amostra T10, sob carga de 19N, na 2ª repetição.....	43
Figura 19 – Gráfico comparativo dos valores médios de dureza ao risco das amostras.	47
Figura 20 – Análise de variância entre as amostras.....	48
Figura 21 – Gráfico de comparação entre a dureza média ao risco para a carga normal de 12N com a fração de precipitados da área total de todas as amostras.	49
Figura 22 - Gráfico de dispersão com a tendência entre a fração de precipitados e o valor de dureza ao risco das amostras, para a carga de 12N	50
Figura 23 - Comparação entre os valores de Dureza ao Risco para a carga de 12N e Dureza Vickers das amostras.....	51
Figura 24 – Gráfico comparativo dos valores médios do coeficiente f_{ab} das amostras.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas e mecânicas do Níquel e do Ferro. Fonte: (ASM, apud SILVA, 2010).....	31
Tabela 2 – Composição química dos metais de adição fornecida pelos fabricantes. Fonte: (SILVA, 2010).....	33
Tabela 3 – Composição química do metal de base. Fonte: (SILVA, 2010).	33
Tabela 4 – Designação dos fatores de controlo para o Método Taguchi. Fonte: (SILVA, 2011)	35
Tabela 5 – Parâmetros de soldagem referente à planilha L18 gerada pelo Método Taguchi. Fonte: (SILVA, 2010)	35
Tabela 6 – Quantidade e dimensões dos precipitados nos corpos de prova. Fonte: (SILVA, 2010).....	37
Tabela 7 – Valor de Dureza Vickers das amostras. Fonte: (SILVA, 2010)	38
Tabela 8 – Largura dos riscos da Amostra T16.....	42
Tabela 9 – Medida das áreas da amostra T5.	43
Tabela 10 – Grupos formados para análise de variância.	44
Tabela 11 – Dureza ao risco médio das amostras	46
Tabela 12 - Coeficiente f_{ab} médio das amostras	52

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	24
Equação 2	25
Equação 3	30
Equação 4	30

LISTA DE SÍMBOLOS

α, β	: Ângulo de ataque do indentador
A_{LB}	: Área projetada pelo indentador
$(A_1 + A_2)$	: Áreas de material deslocado para as bordas do sulco
A_p	: Área resultante da indentação
A_v	: Área transversal do sulco gerado
f_{ab}	: Coeficiente de remoção de material
F_N	: Força normal
F_T	: Força tangencial
h	: Profundidade de penetração
H_0	: Hipótese Nula
H_S	: Dureza ao risco
V	: Velocidade de riscamento
w	: Largura do sulco
R	: Raio do penetrador

LISTA DE SIGLAS

ASM	: American Society for Metals
ASTM	: American Society for Testing and Materials

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVO.....	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1 Tribologia	17
3.2 Desgaste abrasivo	17
3.3 Esclerometria Linear	21
3.3.1 Introdução.....	21
3.3.2 Classificação dos Equipamentos de Esclerometria Linear	22
3.3.3 Dureza ao Risco	23
3.3.4 Coeficiente f_{ab}	25
3.3.5 Parâmetros Básicos do Teste.....	26
3.3.6 Norma Padrão para a Determinar a Dureza ao Risco de Materiais Utilizando um Indentador de Diamante	26
3.4 Superligas	30
3.4.1 Superligas de Níquel.....	31
3.5 Materiais Utilizados	32
4 METODOLOGIA.....	39
4.1 Esclerometria Linear	39
4.2 Análise dos Riscos.....	40
4.2.1 Análise de Variância	44
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1 Dureza ao risco	46
5.2 Coeficiente f_{ab}	51
6 CONCLUSÃO.....	54
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
9 ANEXO.....	58

1 INTRODUÇÃO

O petróleo é considerado a principal fonte de energia no mundo e de grande importância para a sociedade atual. Combinado com o gás natural, correspondem a mais da metade da matriz energética mundial. A PETROBRAS é reconhecida mundialmente pela excelência em tecnologias de exploração e prospecção em águas profundas, produzindo petróleo a 7 mil metros de profundidade. Hoje a produção do óleo em águas profundas é uma realidade, com a expectativa de que em 2018, 52% da produção total virá do pré-sal, levando esta produção a uma das maiores oportunidades da economia brasileira.

O aumento constante das profundidades de extração e reservas descobertas em áreas mais profundas e ultra profundas, demandam o desenvolvimento de novas tecnologias. A busca pela aplicação de novos materiais resistentes à corrosão que proporcionem o aumento da vida útil de dutos e equipamentos usados na produção e no refino de petróleo, bem como transporte e extração, é de grande necessidade. A elevada corrosividade do petróleo é atribuída à presença de diversas impurezas como compostos orgânicos sulfurados, nitrogenados, oxigenados, organometálicos, água, sais minerais e areia (SILVA, 2011).

Revestimentos depositados por soldagem com superligas à base de níquel têm ganhado destaque, uma vez que são capazes de aliar as propriedades especiais de elevada resistência aos ambientes corrosivos, excepcional resistência mecânica à alta temperatura e dureza. As boas propriedades mecânicas dependem da composição química, microestrutura, processo de fabricação e dos parâmetros aplicados e que dentre estes fatores, a microestrutura tem relação direta com as propriedades de resistência ao desgaste (SILVA, 2011).

É importante destacar que existem vários tipos de ligas dentro de uma mesma classe, como por exemplo a Ni-Cr-Mo. No entanto, informações comparativas de soldabilidade e característica de resistência à abrasão entre estas ligas, para aplicação no setor de petróleo e gás, ainda são escassas.

Quando a resistência à corrosão e considerável resistência ao desgaste atuam em conjunto, como no caso da indústria do petróleo, esses materiais apresentam elevado

potencial de aplicação. As superligas de níquel acabam por possuir grande valor comercial, por isso sua aplicação deve possuir um caráter mais descritivo de todas as características que envolvem a sua utilização.

As amostras são soldadas com diferentes parâmetros, logo, além de selecionar a liga que melhor resistirá ao desgaste abrasivo, podem ser selecionados também, os melhores parâmetros de soldagem para tal finalidade. Do ponto de vista operacional busca-se o desenvolvimento e uma otimização dos parâmetros de soldagem para a deposição por TIG com alimentação de arame a frio de forma a torná-lo uma alternativa interessante para uma aplicação em potencial.

Com a esclerometria linear é possível relacionar o efeito de um monoevento abrasivo sobre os revestimentos soldados, a fim de obter dados mecânico-tribológicos, como a classificação das amostras em virtude da resistência ao desgaste abrasivo, dureza ao risco dos materiais, adesão, e identificação do micromecanismo de desgaste presente.

A presente investigação aborda o estudo da deposição de revestimentos de superligas à base de níquel, visando a aplicação de revestimentos no interior de dutos *off-Shore* para a indústria de petróleo e gás. No entanto, a presença de areia escoando no interior dos dutos podem acarretar em desgaste prematuro dos revestimentos, embora em tais aplicações a escolha das ligas seja baseada na sua resistência à corrosão, é importante conhecer qual o seu comportamento quando submetida a um processo de abrasão (SILVA, 2011).

Silva (2011) avaliou através do Abrasômetro Roda de Borracha o desgaste abrasivo dos revestimentos à base de superligas de níquel e concluiu que todos os metais de solda depositados apresentaram um comportamento semelhante do ponto de vista de desgaste abrasivo, devido à alta severidade obtida através do ensaio utilizado.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo do desgaste nas amostras de Inconel 625, Hastelloy C276 e Inconel 686, todas endurecidas por solução sólida, soldadas através do processo TIG com alimentação a frio no substrato do aço ASTM A516 Gr60, através dos ensaios de esclerometria linear, determinando o comportamento mecânico e tribológico, em condições controladas de carga normal, velocidade, comprimento do risco e raio de ponta do indentador utilizado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Tribologia

A Tribologia estuda a interação de superfícies em movimento relativo, abordando o atrito, desgaste e lubrificação (HUTCHINGS, 1992).

O termo Tribologia, foi utilizado, oficialmente, pela primeira vez em 1966 em um relatório feito por H. Peter Jost para o comitê do departamento Inglês de educação e ciência. O termo foi definido como a “ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionados” (JOST, 1966). Jost foi o primeiro a estudar os impactos econômicos devido à utilização dos conhecimentos de Tribologia. As estimativas de reduções de gastos apresentadas no relatório de Jost são de que mediante o uso do conhecimento existente podiam-se reduzir as perdas por desgaste em 20%.

O atrito é definido como sendo a resistência ao movimento relativo entre corpos. O desgaste, por sua vez, é definido como a perda progressiva de material da superfície de um corpo como consequência do movimento relativo entre os corpos. Ambos não são propriedades intrínsecas do material, mas uma característica do tribosistema (ZUM GAHR, 1987).

3.2 Desgaste abrasivo

Desgaste abrasivo é a remoção de material causada pela presença de partículas duras. Essas partículas podem estar entre ambas as superfícies em movimento relativo ou aderidas a uma dessas. Esse desgaste pode ser causado, ainda, pela presença de protuberâncias duras em uma ou ambas as superfícies em movimento relativo (ZUM GAHR, 1987).

A partícula dura pode ser um produto do movimento entre as superfícies ou um mineral presente no meio, como a sílica, alumina, entre outros ou um fragmento endurecido removido do processo de desgaste de uma das superfícies.

Caracterizar os mecanismos presentes em condições de desgaste abrasivo em estudos tribológicos é de fundamental importância para a análise das características de perda de massa devido ao micromecanismo atuante. Esses mecanismos definem os processos de interação entre o material abrasivo ou asperidades duras e a superfície desgastada (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001).

A Figura 1 esquematiza os micromecanismos de desgaste presentes no desgaste abrasivo.

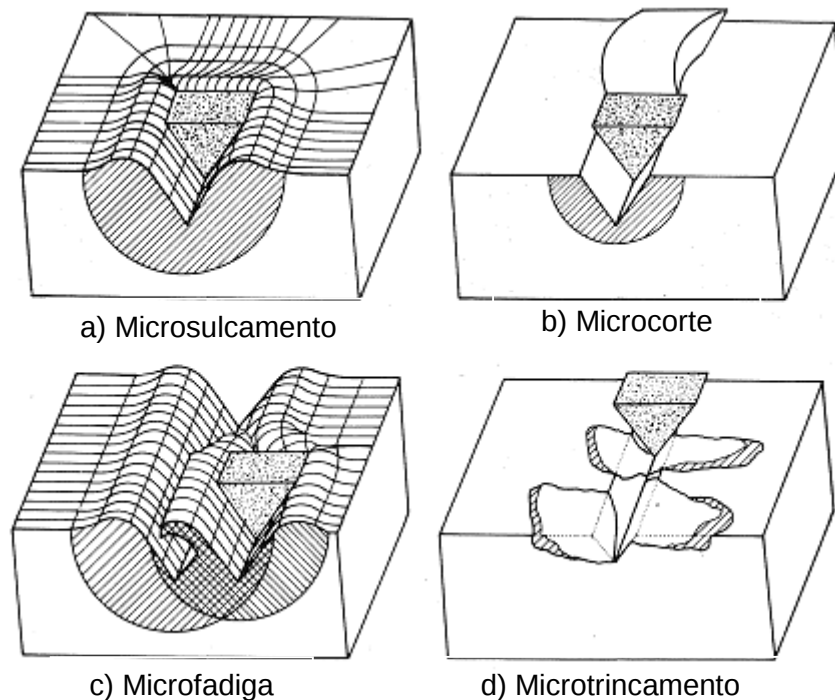


Figura 1 - Esquema dos micromecanismos de desgaste. Fonte: (ZUM GAHR, 1987)

O microsulcamento (Figura 1.a) é caracterizado por uma elevada deformação plástica da superfície desgastada devido a ação de partículas abrasivas (ZUM GAHR, 1987). O material deformado plasticamente é deslocado totalmente para as laterais do sulco, não ocorrendo remoção de material, ou seja, nenhum material é removido, e sim escoado pelas bordas da partícula (HUTCHINGS, 1992).

As partículas abrasivas podem interagir sucessivamente ou simultaneamente. Se ocorrer um regime dúctil devido às condições do desgaste, tem-se a interação descrita como microsulcamento repetitivo ou microfadiga (Figura 1.c) (FERREIRA, 2010).

Quando as condições de desgaste não permitem elevados níveis de deformação plástica do material, ocorre o mecanismo de microcorte (Figura 1.b), com consequente produção de debris (FERREIRA, 2010). A perda de material igual ao volume do sulco produzido ocorre através do microcorte puro. Existe também o mecanismo de formação de proa, sendo um comportamento intermediário entre o microsulcamento e o microcorte. O deslocamento é limitado, podendo haver apenas a adesão entre a face da partícula e a protuberância do material (HUTCHINGS, 1992).

O microtrincamento (Figura 1.d) pode ocorrer quando altas tensões concentradas são impostas ao material por partículas abrasivas. Esse mecanismo é mais comumente observado na abrasão de materiais frágeis, onde grandes porções da superfície se destacam em forma de debris, devido à formação e propagação de trincas (ZUM GAHR, 1987). O tamanho do debri gerado é muito maior que a profundidade do sulco formado no material.

Alguns materiais que são expostos ao desgaste abrasivo, possuem fases duras em uma matriz macia. Essas segundas fases podem ser carbonetos, que possuem uma dureza bastante elevada, e podem ser precipitados através da fundição ou tratamentos térmicos na liga. A resposta desses materiais depende do tamanho da fase dura em relação ao tamanho da deformação causada por cada partícula abrasiva individualmente (HUTCHINGS, 1992). Caso o tamanho do dano seja maior do que as partículas de segundas fases formadas e maior que o tamanho da separação dessas partículas o material irá comportar-se homogeneamente, conforme a Figura 2.

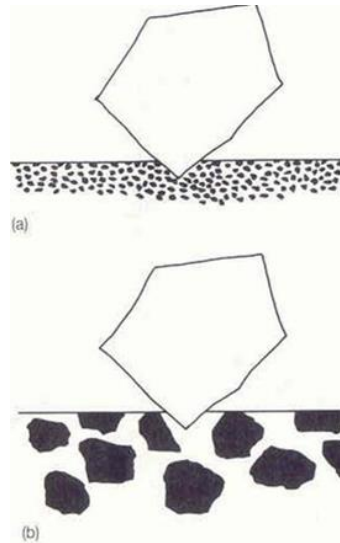


Figura 2 - Ilustração da importância do tamanho do contato da partícula abrasiva e a região de fases duras precipitadas no desgaste abrasivo. (a) o material responde de maneira homogênea, enquanto (b) responde de forma heterogênea. Fonte: (HUTCHINGS, 1992)

Segundo Hutchings (1992), a regra geral de que uma grande fração de partículas de segundas fases duras são desejáveis para melhorar a resistência ao desgaste não é, contudo, universalmente verdadeira. A matriz deve ter boa tenacidade para absorver a energia do contato da partícula abrasiva com a fase dura, caso contrário, se a matriz for frágil, as partículas duras agirão como concentradores de tensão que formarão a trinca que se propagará pela matriz e removerá o material junto com as segundas fases, que podem agir, como abrasivos no sistema.

Se as partículas duras forem comparadas com o tamanho do abrasivo e do dano causado por ele, o material se comportará de forma heterogênea. A ação da partícula abrasiva poderá levar ao escoamento ou a fratura, dependendo da carga, tamanho, geometria e propriedades do abrasivo e da resistência da interface com a fase dura HUTCHINGS (1992).

No estudo do desgaste abrasivo, podem ser feitas abordagens de análise local. Na abordagem local busca-se compreender os fenômenos do desgaste abrasivo, estudando parâmetros e aspectos do desgaste na interação de uma partícula dura com a superfície do material (FERREIRA, 2010). Na abordagem local, uma grande técnica em potencial de uso é a esclerometria linear.

3.3 Esclerometria Linear

3.3.1 Introdução

Também conhecido como *Scratch Test* (teste de riscamento), o ensaio de esclerometria linear é utilizado para avaliar mecanicamente a superfície de um material através da simulação de um monoevento abrasivo. Com elemento duro, ou seja, um indentador, é possível gerar um sulco sobre a superfície do material a ser analisado. Os resultados podem variar desde um sulcamento com presença apenas de deformação plástica para materiais dúcteis à geração de trincas e debris em materiais frágeis, bem como a delaminação do revestimento sobre o substrato. Os ensaios podem ser utilizados para obter as seguintes informações (JACOBSSON *et al*, 1992):

- Caracterizar os mecanismos de deformação e remoção de material
- Avaliar ou classificar materiais relacionando a resistência a abrasão
- Medir Dureza ao Risco
- Avaliar a adesão entre o revestimento e o substrato

A Figura 3 mostra um esquema do ensaio, com alguns parâmetros que podem ser definidos durante o início do ensaio como: a velocidade (V), e força normal (F_N). Outro parâmetro que é obtido com o ensaio realizado é a força tangencial (F_T).

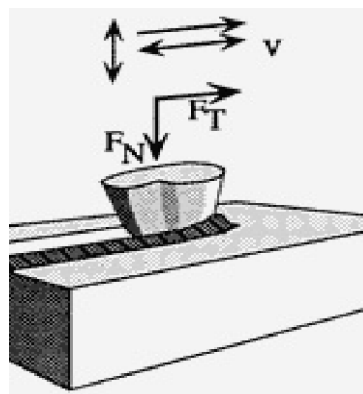


Figura 3 - Esquema do ensaio de esclerometria linear. Fonte: (JACOBSSON *et al*, 1992)

Após o ensaio realizado, a seção transversal do sulco é obtida conforme o esquema da Figura 4.



Figura 4 – Esquema da seção transversal do sulco formado. Fonte: (Adaptado de JACOBSSON et al, 1992)

3.3.2 Classificação dos Equipamentos de Esclerometria Linear

O ensaio de riscamento deve ser realizado em condições padrões e controladas. Tendo em vista essa necessidade de padronização alguns parâmetros são estabelecidos da seguinte forma (JACOBSSON *et al*, 1992):

- I. Baixa velocidade: o elemento riscante (indentador) normalmente é montado para se mover ao longo da superfície a velocidades de poucos milímetros por segundo, gerando assim um sulco de passe único. O elemento pode ser configurado também de forma a gerar um sulco de múltiplos passes, ou ainda de forma a deslizar em trajetórias circulares. As três configurações estão mostradas na Figura 5.

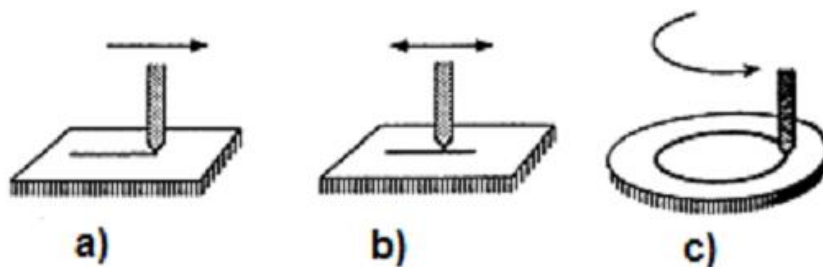


Figura 5 - Tipos de ensaios de esclerometria linear em equipamentos de baixa velocidade: a) passe único, b) múltiplos passes e c) trajetória circular. Fonte: (JACOBSSON et al, 1992)

- II. Baixa velocidade *in situ*: equipamentos que realizam os ensaios de esclerometria no interior de um microscópio eletrônico de varredura (MEV),

utilizado em estudos mais detalhados dos mecanismos de desgaste e formação do sulco. Esse tipo de ensaio é mostrado na Figura 6.

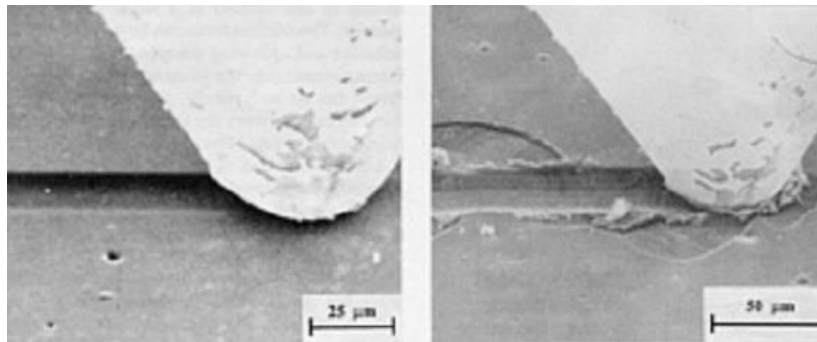


Figura 6 - Esclerometria linear in situ. Fonte: (JACOBSSON et al, 1992)

- III. Alta velocidade: nesta configuração tanto simples como múltiplos passes podem ser feitos. Duas formas que podem ser realizadas estão ilustradas na Figura 7, sendo o elemento riscante montado em um pêndulo ou na periferia de um disco girante.

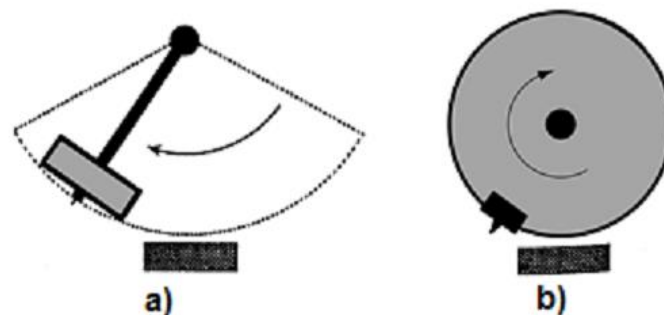


Figura 7 - Equipamentos de esclerometria linear de alta velocidade, a) pêndulo e b) disco girante. Fonte: (JACOBSSON et al, 1992)

3.3.3 Dureza ao Risco

A dureza ao risco (H_s) foi uma das primeiras técnicas utilizadas por meio da esclerometria para classificar os materiais em diferentes categorias de acordo com a resistência à deformação no contato. Medido em unidades de força por área, caracteriza a resistência de uma superfície sólida ao riscamento usando um indentador típico de alta dureza, com raio definido de ponta submetido à força e velocidade constantes. A dureza ao risco é definida como a razão entre a carga normal

de riscamento e a área normal projetada da face ativa do penetrador, segundo a equação 1:

$$H_s = \frac{\text{Força Normal}}{\text{Área Projetada}} \quad (1)$$

A área normal projetada é determinada em função do modelo do indentador utilizado no teste de riscamento. Essa área é estimada através do sulco resultante de um ensaio e da geometria do elemento riscante, assumindo-se algumas hipóteses sobre a área de contato indentador-material. De modo a padronizar os ensaios de esclerometria, é comum utilizar penetradores de ensaios de dureza para representar tais partículas abrasivas, conforme ilustrado na Figura 8.

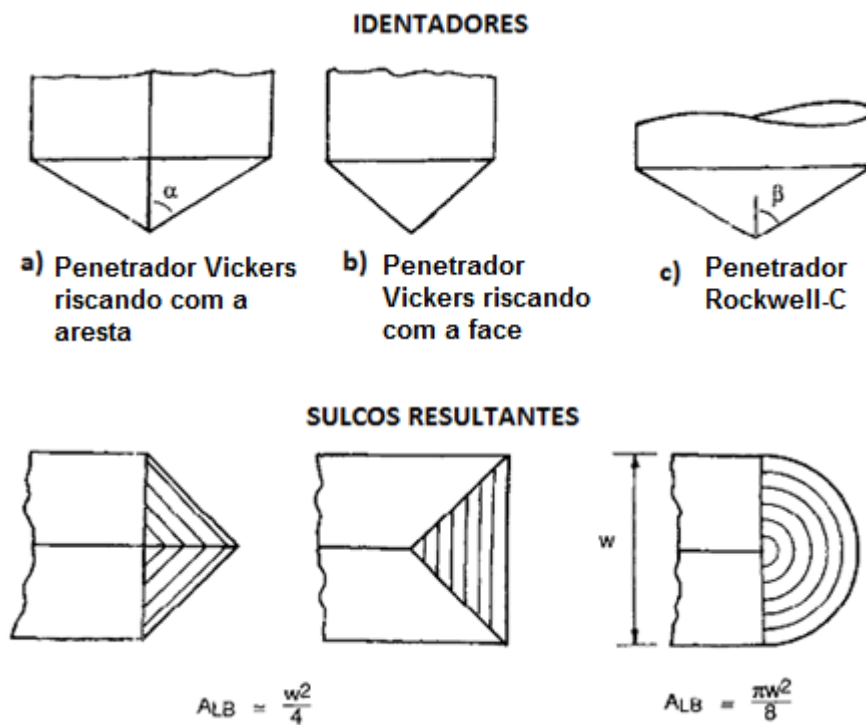


Figura 8 – Alguns modelos de indentadores com representação de área projetada. Fonte: (WILLIAMS, 1996)

3.3.4 Coeficiente f_{ab}

Durante a abrasão de materiais macios, somente uma parte do volume do desgaste produzido por partículas abrasivas é removida em forma de detritos. O restante é deslocado plasticamente para as bordas do sulco (STROUD e WILLMAN, 1962). O fator f_{ab} é definido como sendo a razão entre o volume de material removido por desgaste e o volume do sulco gerado, expresso pela equação 2 (ZUM GAHR, 1987):

$$f_{ab} = \frac{A_v - (A_1 + A_2)}{A_v}$$

(2)

A_v = área transversal do sulco gerado

$(A_1 + A_2)$ = áreas de material deslocado para as bordas do sulco

A Figura 9 mostra um esquema representativo do coeficiente f_{ab} para a seção transversal de um sulco teórico.

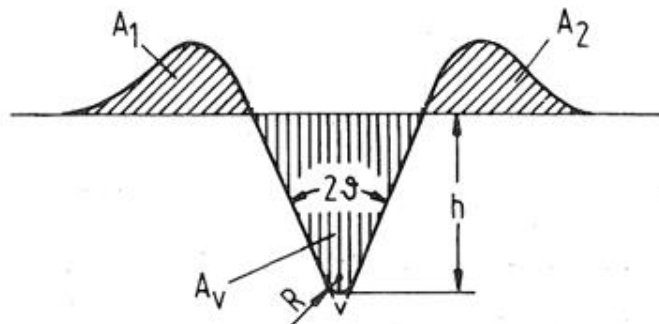


Figura 9 – Seção transversal do sulco gerado, para estudo do coeficiente f_{ab} . Fonte: (ZUM GAHR, 1987)

O coeficiente f_{ab} pode ser relacionado diretamente com os micromecanismos de desgaste apresentados. Para $f_{ab} = 0$, há a presença de microsulcamento puro. Para $f_{ab} = 1$, o mecanismo encontrado será o microcorte puro. Valores de $f_{ab} > 1$ são encontrados apenas em ensaios de esclerometria em materiais frágeis, com a predominância do mecanismo de microtrincamento, grandes fragmentos de desgaste são removidos da superfície devido à formação e propagação de trincas.

3.3.5 Parâmetros Básicos do Teste

Dentre os parâmetros básicos que influenciam na realização dos testes de esclerometria linear e os quais devem ser observados e selecionados de forma que busque a melhor aplicação, são citados:

- Material do Indentador
- Forma do Indentador
- Orientação do Indentador em relação à direção de riscamento
- Preparação das Amostras
- Velocidade de Riscamento
- Carga Normal ou Profundidade do Sulco
- Número de Passes

3.3.6 Norma Padrão para a Determinar a Dureza ao Risco de Materiais Utilizando um Indentador de Diamante

A norma ASTM G171-03 é usada para determinar os parâmetros necessários na determinação do número de dureza ao risco de materiais utilizando indentador de diamante cônico com ponta hemisférica. É apresentado a seguir um resumo da norma utilizada.

3.3.6.1 Sumário da Metodologia

O ensaio se baseia na produção de um sulco em uma superfície sólida a partir da movimentação de um indentador de diamante de geometria específica ao longo de um caminho específico sob carga e velocidade constantes. A largura média do sulco é medida e esse valor é usado para calcular o número de dureza ao risco.

Este ensaio é geralmente conduzido na ausência de lubrificação à temperatura ambiente. Esta metodologia permite, porém, que ensaios sejam realizados sob

lubrificação e altas temperaturas, desde que os requerimentos para validação do ensaio sejam atendidos e que as condições de teste sejam cuidadosamente descritas.

Efeitos da umidade do ar entre outras condições atmosféricas do ambiente podem afetar os resultados do ensaio dependendo da sensibilidade do material àquele ambiente. Se tais efeitos forem observados, precauções devem ser tomadas para o controle da atmosfera e as condições desta devem ser descritas.

3.3.6.2 Significado e Uso da Norma

Sendo o teste desenvolvido com o objetivo de determinar a resistência da superfície sólida à deformação permanente quando submetida à ação de uma força pontual pela ponta do indentador. O número de dureza ao risco envolve uma diferente combinação de propriedades da superfície, pois o indentador move-se tangencialmente em relação a esta.

O teste pode ser realizado com diferentes materiais, como metais, ligas, polímeros e até cerâmicas. O critério principal envolve a determinação de um risco que pode ser medido na superfície testada, sem que sofra fratura catastrófica, ou delaminação excessiva na superfície.

Casos de danos severos a superfície testada, assim como imprecisão na medição da largura do risco e casos em que a borda do risco esteja distorcida ou sofra perda de material excessivo invalidam o teste.

3.3.6.3 Aparato Experimental

Numa descrição geral, o aparato utilizado em um ensaio de esclerometria linear consiste em:

- Que o indentador seja cônico, com ângulo de ponta de $120^\circ (\pm 5^\circ)$, e o cone deve terminar numa ponta hemisférica de $200\ \mu\text{m} (\pm 10\ \mu\text{m})$ de raio. O material do indentador deve ser diamante.

- Porta amostra para o material a ser ensaiado;
- Meios de aplicar a carga normal enquanto o indentador possui trajetória definida a velocidade constante;
- Meios de medição da largura do sulco resultante com precisão adequada;

Todo o aparato deve estar dentro das especificações e devidamente calibrado.

3.3.6.4 Procedimento Experimental

Visando uma melhor padronização para obtenção dos resultados, o procedimento experimental, determina os o tratamento dos principais fatores que influenciam no teste, como:

- **Preparo da Amostra:** A superfície da amostra deve ser polida para facilitar medição e observação da largura do risco. Deve apresentar baixa rugosidade.
- **Limpeza da Amostra:** As amostras devem ser limpas para livrá-las de qualquer tipo de contaminação como poeira, digitais, graxa, oleosidade e etc.
- **Inspeção do Penetrador:** O penetrador deve ser inspecionado através de microscópio óptico ou mesmo através de perfis topográficos para certificar-se que não haja defeitos, desgaste ou material residual aderido resultante dos processos de fabricação do elemento ou mesmo de testes anteriores. Presença de óleo na ponta do penetrador pode lubrificar a sua superfície e reduzir o número aparente de Dureza ao Risco. Material aderido pode aumentar a força de riscamento e formar estrias na extensão do risco. Limpar o penetrador com algodão ou um pano limpo umedecido com acetona ou outro solvente de limpeza é usualmente adequado.
- **Força Normal:** Deve ser escolhida de tal forma que gere um sulco mensurável, mas não deve ser grande a ponto de gerar fratura, delaminação, fragmentação ou outro tipo de defeito superficial grosseiro. Uma série de riscos com cargas variadas podem ser utilizados para avaliar a resistência do material de teste ao aumento de tensões localizadas.

- **Tamanho e Forma do Risco:** O tamanho do risco deve ser, no mínimo, 5 mm. Esses riscos não são necessariamente lineares, eles podem ter forma de arco. Para evitar efeitos associados às bordas e ao início e fim do risco, o tamanho do risco deve ser, também, maior que 20 vezes a largura ou a profundidade do mesmo, deve-se escolher o maior desses dois parâmetros e multiplicá-lo por 20.
- **Velocidade de Riscamento:** A velocidade deve ser constante durante todo o teste. E deve variar entre 0.2 e 5 mm/s.
- **Conduzindo o Teste:** O teste deve ter no mínimo 3 riscos paralelos e separados de uma distância equivalente a no mínimo 5 vezes a largura do risco anterior.
- **Medindo a Largura:** Utilizando um microscópio óptico de medida ou um perfilômetro, mede-se a largura de cada risco. Devido a efeitos de aceleração e desaceleração, as extremidades dos riscos não devem ser incluídas nessas medidas.

3.3.6.5 Cálculos

Com as características geométricas do indentador cônico utilizado nesta análise, a área projetada (A_{LB}) no contato é dada pela equação 3:

$$A_{LB} = \frac{\pi \times w^2}{8} \quad (3)$$

Onde, w é a largura do sulco.

Aplicando esta área à equação (1), é possível representar a dureza ao risco para um indentador cônico em função da largura do sulco gerado pelo ensaio, equação 4.

$$H_S = \frac{8 \times F_N}{\pi \times w^2} \quad (4)$$

H_S é a dureza ao risco; F_N é a força normal aplicada; w é a largura do sulco.

3.4 Superligas

As superligas constituem uma classe especial de materiais de engenharia, as quais são classificadas em três grandes grupos: Superligas a base de níquel, superligas a base de cobalto e superligas a base de ferro. Esta classificação considera o elemento químico majoritário presente na liga. Sims (1978) propôs uma definição de superligas, com razoável aceitação da comunidade científica e tecnológica, como sendo: *“Ligas desenvolvidas para aplicações em serviço à alta temperatura, geralmente baseadas em elementos químicos do grupo VIIIA, na qual tensionamentos mecânicos relativamente severos são encontrados, e no qual alta estabilidade superficial é frequentemente requerida”*.

3.4.1 Superligas de Níquel

As superligas de níquel constituem uma das principais classes das superligas. O níquel puro apresenta estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) estável até seu ponto de fusão, sem transformações alotrópicas de fase. Possui solubilidade total ao cobre, e ampla faixa de solubilidade para elementos como cromo e ferro. Sob alguns aspectos, apresenta uma marcante similaridade com o ferro, sendo um pouco mais denso, e tendo propriedades mecânicas e magnéticas bastante similares (SILVA, 2010). A partir de uma comparação com o principal elemento formador do aço, algumas propriedades do níquel e ferro são listadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas e mecânicas do Níquel e do Ferro. Fonte: (ASM, apud SILVA, 2010)

Propriedade	Níquel	Ferro
Densidade (g/cm ³)	8,89	7,87
Ponto de fusão (°C)	1.453	1.535
Coef. de expansão térmica (m/(m·°C))	$13,3 \times 10^{-6}$	$11,8 \times 10^{-6}$
Condutividade térmica (25°C) (W/m·K)	92	80
Resistividade elétrica (Ωm)	$9,7 \times 10^{-8}$	$7,0 \times 10^{-8}$
Módulo de elasticidade (kPa)	204×10^6	211×10^6
Limite de resistência (MPa)	462	
Limite de escoamento, 0,2% (MPa)	148	
Alongamento em 51 mm (%)	47	

Embora níquel e ferro apresentem características muito semelhantes, a estrutura cristalina das ligas de níquel é completamente diferente do ferro. Isto torna metalurgia do níquel e de suas ligas de ferro, possibilitando uma alta versatilidade na elaboração de ligas com composições químicas das mais variadas para garantir excelente resistência mecânica e elevada resistência ao desgaste, especialmente em condições de elevada temperatura, além de excelente resistência à corrosão em uma infinidade de meios agressivos (ASM, apud SILVA, 2010).

O uso inicial das ligas de níquel para aplicações críticas em sistemas que operam em alta temperatura se deve especialmente à sua alta resistência à corrosão e oxidação, a qual é baseada na adição de cromo à liga, e a sua alta resistência mecânica à elevada temperatura, conferida pela presença de outros elementos químicos (BROOKS, 1984).

Essas ligas possuem uma matriz gama (γ) com estrutura cúbica de face centrada (CFC), e são classificadas em quatro grupos, com base no mecanismo de aumento de resistência (BROOKS, 1984; ASM, 1990):

- ✓ Ligas endurecidas por solução sólida
- ✓ Ligas endurecidas por precipitação
- ✓ Ligas endurecidas por dispersão de óxido.
- ✓ Ligas fundidas

O endurecimento por solução sólida pode ser aplicado em praticamente todas as ligas a base de níquel. O segundo grupo usa como mecanismo endurecedor a formação de precipitados, como fases intermetálicas tipo γ' , γ'' , Laves, além de boretos e carbonetos (ASM, 1990). O terceiro grupo obtém o aumento de resistência pela dispersão de partículas muito finas de óxido refratário ao longo da matriz. O último grupo é constituído por ligas que são destinadas a aplicações de fundição e podem ter sua resistência aumentada por solução sólida ou por precipitação.

3.5 Materiais Utilizados

Os materiais utilizados nesse trabalho foram obtidos por Silva (2010), com todos os procedimentos de produção das amostras apresentados em sua tese de doutorado e resumido no presente trabalho através deste tópico.

Os revestimentos foram produzidos através de soldagem TIG com alimentação de arame frio. Os processos foram todos feitos em uma bancada robotizada para garantir maior reprodutibilidade dos resultados. Foram utilizados metais de adição de superligas à base de Níquel classificadas segundo a AWS como AWS ER-NiCrMo-3 (Inconel 625), AWS ER-NiCrMo-4 (Hasteloy C-276) e AWS ER-NiCrMo-14 (Inconel

686), todas em arame bobinado com diâmetro de 1,12 mm. As composições químicas dos metais de adição encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química dos metais de adição fornecida pelos fabricantes. Fonte: (SILVA, 2010)

Item	Composição, peso %							
	Ni	C	Cr	Mo	W	Fe	Al	Ti
INCONEL 625 (ERNiCrMo-3)	64,43	0,011	22,2	9,13	-	0,19	0,09	0,23
	Nb	Mn	Si	Cu	Co	V	P	S
	3,53	0,01	0,05	0,01	0,03	-	0,002	0,002
HASTELOY C-276 (ERNiCrMo-4)	Ni	C	Cr	Mo	W	Fe	Al	Ti
	56,80	0,002	16,13	16,28	3,38	6,07	-	-
	Nb	Mn	Si	Cu	Co	V	P	S
	-	0,52	0,03	0,06	0,13	0,17	0,07	0,002
INCONEL 686 (ERNiCrMo-14)	Ni	C	Cr	Mo	W	Fe	Al	Ti
	58,22	0,01	20,53	16,39	3,97	0,29	0,26	0,04
	Nb	Mn	Si	Cu	Co	V	P	S
	-	0,23	0,059	0,01	-	-	0,002	0,001

As ligas Inconel 625 e Hastelloy C-276 possuem alta resistência a corrosão, já conhecida, e são muito utilizadas na indústria do petróleo e gás. A liga Inconel 686 foi escolhida por ser uma liga nova, com alta resistência a corrosão, maior do que as ligas anteriores, cuja elaboração foi baseada na composição da liga Hastelloy C-276 com um acréscimo no teor de Cr para aumentar a resistência à corrosão generalizada e corrosão por pites (SILVA, 2010).

O metal de base utilizado foi o aço ASTM A516 Gr 60, que foi escolhido por se tratar de um aço usado na construção de equipamentos na indústria de petróleo e gás natural, os quais são passíveis de revestimento. As composições químicas deste metal de base são encontradas na Tabela 3

Tabela 3 – Composição química do metal de base. Fonte: (SILVA, 2010).

Item	Composição, peso %							
	Ni	C	Cr	Mo	Fe	Al	Mn	Si
ASTM A516 Gr. 60	0,01	0,15	0,02	0,01	Bal.	0,02	0,95	0,2

Os gases de proteção utilizados foram argônio puro (99,99%), argônio com 30% de hélio e argônio com 0,01% de NO. O eletrodo de tungstênio utilizado no processo TIG foi do tipo Tório, com diâmetro de 4,0 mm.

Para garantir a largura mínima da camada foram depositados de 4 a 7 cordões dispostos lado a lado, cuja sobreposição foi suficiente para proporcionar um bom acabamento superficial e ausência de defeitos. Todas as chapas foram previamente identificadas e passaram por processo de limpeza superficial. Alguns parâmetros foram previamente estudados e mantidos constantes. A Distância da Ponta do Eletrodo à Peça (DPEP) de 10 mm foi escolhida por resultar em baixos níveis de diluição, uma característica importante para os revestimentos. Já o modo de alimentação de arame foi à frente da tocha com o arame passando por dentro do arco e com uma distância da Ponta do Arame à Peça (DPAP) fixada em 3 mm, o ângulo de alimentação do arame foi de 50°, o ângulo de afiação do eletrodo de 50° e a vazão de gás de 15 l/min.

Para avaliar as inúmeras variáveis consideradas importantes para a soldagem de revestimentos foi utilizada uma ferramenta de planejamento de experimentos capaz de indicar os parâmetros ótimos de um processo industrial que resultem na maximização de uma determinada propriedade/característica, como por exemplo, a qualidade do produto (SILVA, 2011). Dentre os diversos métodos foi escolhido o método Taguchi o qual utiliza um arranjo ortogonal planejado especialmente para cada condição a ser avaliada, tornando possível estudar os efeitos dos parâmetros com um reduzido número de experimentos. Os fatores de controle (ou variáveis) a serem avaliada foram a técnica da energia (TE), o nível e energia de soldagem (E), o tipo de liga (L), o tipo de gás de proteção (G), e o tipo de tecimento (T). A Figura 10 ilustra os três tipos de movimento descritos pela tocha de soldagem durante a deposição: espiral, triangular, duplo 8.

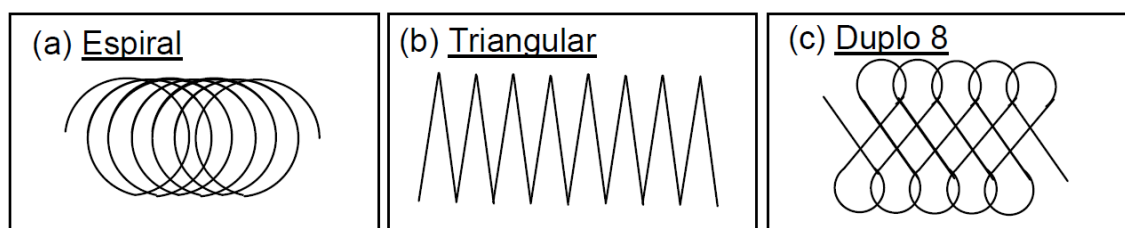


Figura 10 – Desenho ilustrando a trajetória para cada tipo de tecimento aplicado. Fonte: (SILVA, 2011)

A Tabela 4 apresenta os fatores de controle utilizados para a soldagem dos revestimentos, e consequente classificação em níveis com os parâmetros que facilitam a obtenção do arranjo ortogonal de uma matriz do tipo L18 gerada pelo método de Taguchi, apresentado na Tabela 5. Todos os fatores foram obtidos a partir de testes preliminares e ensaios definitivos em SILVA (2010).

Tabela 4 – Designação dos fatores de controle para o Método Taguchi. Fonte: (SILVA, 2011)

Fatores de controle	Níveis		
	1	2	3
Técnica da energia (TE)	TE V	TE I	-
Energia de soldagem (E)	Baixa	Média	Alta
Liga (L)	Inconel 625	Hasteloy C-276	Inconel 686
Gás de Proteção (G)	Ar puro	Ar + NO	Ar + He
Tecimento (T)	Espiral	Triangular	Duplo 8

TE I – variando a corrente de soldagem para variar a energia e mantendo a velocidade constante; TE V – variando a velocidade de soldagem e mantendo constante a corrente de soldagem

Tabela 5 – Parâmetros de soldagem referente à planilha L18 gerada pelo Método Taguchi. Fonte: (SILVA, 2011)

Ensaio	TE	E	L	G	T	Corrente Efícaz I _e (A)	Velocidade de soldagem V _s (cm/min)
1	1	1	1	1	1	335	25
2	1	1	2	2	2		25
3	1	1	3	3	3		25
4	1	2	1	1	2		21
5	1	2	2	2	3		21
6	1	2	3	3	1		21
7	1	3	1	2	1		17
8	1	3	2	3	2		17
9	1	3	3	1	3		17
10	2	1	1	3	3	285	21
11	2	1	2	1	1	285	
12	2	1	3	2	2	285	
13	2	2	1	2	3	335	
14	2	2	2	3	1	335	
15	2	2	3	1	2	335	
16	2	3	1	3	2	385	
17	2	3	2	1	3	385	
18	2	3	3	2	1	385	

Foram realizados a preparação de 18 amostras conforme os parâmetros da Tabela 5. Ao final de todo o processo foi verificado que as condições 1, 7, 11, 12 e 15, não puderam ser produzidas adequadamente durante a etapa de soldagem, devido à combinação de parâmetros de soldagem inadequada.

A caracterização microestrutural de alguns corpos de prova foram feitas por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). A microestrutura dos revestimentos depositados com as três ligas estudadas (Inconel 625, Hastelloy C276 e Inconel 686) foi constituída por uma matriz γ e precipitados interdendríticos e intergranulares. A quantificação das fases formadas no primeiro e últimos cordões de solda foi o primeiro resultado analisado. Embora cada conjunto de liga apresente, em geral, duas principais categorias de fases, dependendo da composição química (fase Laves e o complexo NbTiC/TiNbN para a liga 625 (Figura 11.a) com adição de Nb e as fases P (Figura 11.b), σ e μ para as ligas C276 e 686 com alto teor de molibdênio e adição de W). Informações detalhadas sobre a morfologia de distribuição e composição química detalhada podem ser encontradas na tese de doutorado de SILVA (2010).

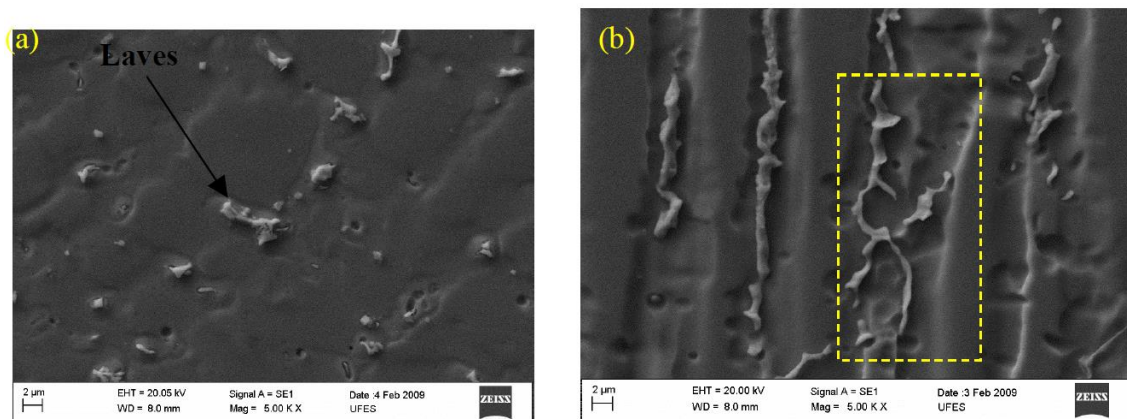


Figura 11 - Imagens dos precipitados. (a) Fase Laves, encontrados na liga Inconel 625. (b) Precipitados de fase P, encontrados nas ligas Inconel 625 e Hastelloy C276. Fonte: (SILVA, 2011)

Na análise considerou-se somente a diferenciação entre matriz e precipitado, independentemente do tipo de fase secundária presente. Os resultados da quantificação de fases estão apresentados em um comparativo na Figura 12, extraído do trabalho de SILVA (2010). Estes valores correspondem ao valor médio obtido pela análise de pelo menos 40 imagens, de forma a produzir resultados com 95% de confiabilidade. Para o estudo dos resultados as condições testadas foram acrescidas da letra T, para facilitar a identificação das amostras.

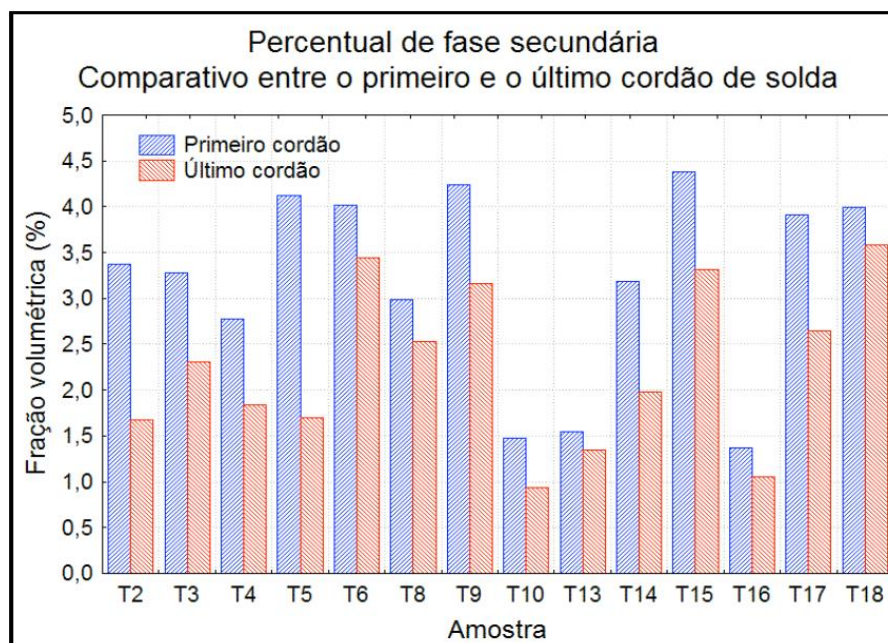


Figura 12 – Análise comparativa de percentual de fases secundárias entre o primeiro e o último cordão de solda. Fonte: (SILVA, 2010)

Dados como área de cada precipitado, fração da área total e perímetro de cada precipitado, do primeiro e do último cordão de solda, sendo esses, dados importantes para posterior relação com o desgaste do monoevento abrasivo, são apresentados na Tabela 6. Ensaios de Dureza Vickers (Tabela 7), também foram realizados na extensão do revestimento.

Tabela 6 – Quantidade e dimensões dos precipitados nos corpos de prova. Fonte: (SILVA, 2010).

	CORPO DE PROVA	PRIMEIRO CORDÃO				ÚLTIMO CORDÃO			
		NÚMERO DE PRECIPITADOS	ÁREA DE CADA PRECIPITADO (μm^2)	FRAÇÃO DA ÁREA TOTAL (%)	PERÍMETRO DE CADA PRECIP. (μm)	NÚMERO DE PRECIPITADOS	ÁREA DE CADA PRECIPITADO (μm^2)	FRAÇÃO DA ÁREA TOTAL (%)	PERÍMETRO DE CADA PRECIP. (μm)
INCONEL 625	T-4	897,04	10,66	2,77	12,59	844,75	7,49	1,84	10,19
	T-10	629,27	8,05	1,48	10,42	480,5	6,69	0,94	8,82
	T-13	824,27	7,15	1,55	9,42	813,77	5,75	1,35	8,29
	T-16	593,25	8,23	1,38	10,60	542,17	6,74	1,06	9,16
INCONEL 686	T-3	777,25	14,54	3,28	16,41	753	10,94	2,31	14,24
	T-6	1137,96	12,78	4,02	14,86	669,56	18,05	3,44	18,36
	T-9	678,00	22,50	4,24	20,34	543,54	20,19	3,16	19,11
	T-18	596,55	21,35	3,99	19,61	512,88	24,06	3,58	22,54
HASTELLOY C-276	T-2	512,89	23,33	3,37	23,24	374,73	15,43	1,68	17,01
	T-5	904,56	15,70	4,13	17,94	841,69	6,88	1,69	10,50
	T-8	1463,5	7,06	2,98	11,31	1249,81	7,05	2,53	10,09
	T-14	1410,85	8,96	3,18	12,61	513,64	13,53	1,98	14,55
	T-17	593,00	23,99	3,91	22,62	585,54	15,69	2,65	18,24

Tabela 7 – Valor de Dureza Vickers das amostras. Fonte: (SILVA, 2010)

	Dureza Vickers (HV)												
Amostras	T2	T3	T4	T5	T6	T8	T9	T10	T13	T14	T16	T17	T18
Média (HV)	253	223	227	230	235	182	228	178	237	246	182	228	216
Desvpad	35	37	48	32	29	18	26	27	36	32	13	33	31

Os resultados de desgaste abrasivo utilizando o abrasômetro roda de borracha horizontal mostraram que de uma forma geral, todos os metais de solda depositados apresentaram um comportamento semelhante do ponto de vista de desgaste abrasivo, com pode ser observado na Figura 13.

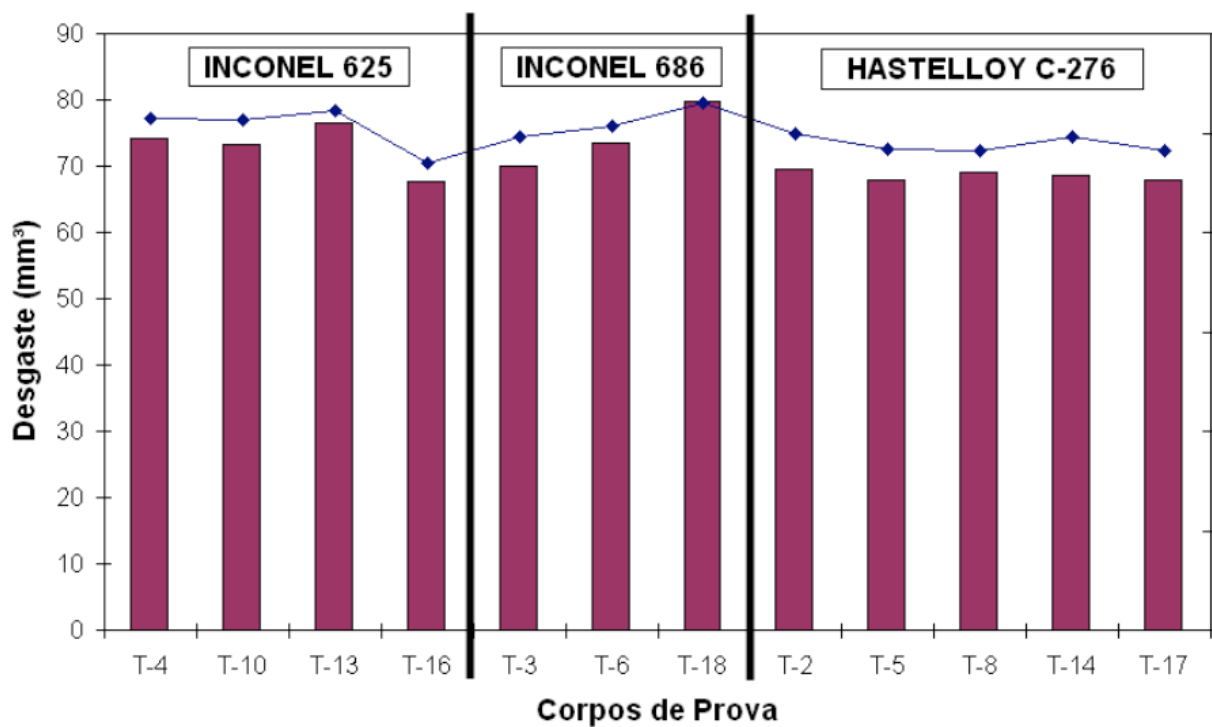


Figura 13 – Resultados do ensaio de desgaste abrasivo roda de borracha. Fonte: (SILVA, 2011)

4 METODOLOGIA

Este trabalho possui como base as amostras produzidas em SILVA (2010), e cedidas pelo autor para o presente estudo. Buscando uma melhor parametrização em relação ao trabalho original as amostras seguiram a mesma identificação, como apresentados na Tabela 7. Durante a realização dos ensaios, não foi possível o contato com a amostra T9, assim sendo, ela foi excluída das análises.

Através deste capítulo é apresentado mais claramente o procedimento experimental para a realização do trabalho através dos ensaios de esclerometria linear, juntamente com uma validação para análise dos resultados obtidos.

4.1 Esclerometria Linear

Os ensaios de esclerometria linear foram produzidos através do equipamento Universal Micro Tester modelo APEX da CETR/Bruker (Figura 14), classificado como um equipamento de baixa velocidade, localizado no Laboratório de Caracterização da Superfície dos Materiais (LCSM) do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo.

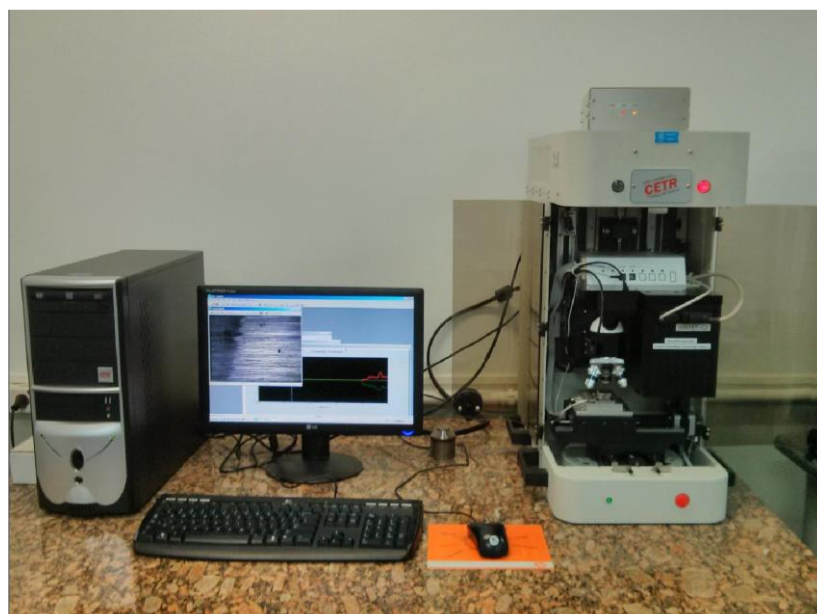


Figura 14 – Universal Micro Tester modelo APEX da CETR/Bruker. Fonte: (MARTINS, 2014).

Nos ensaios foi utilizado um indentador de diamante (tipo *Rockwell C*) com ângulo e raio de ponta de 120° e 200 µm, respectivamente. Os riscos foram feitos seguindo a norma ASTM G 171–3: “*Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus*”, para servir de referência na preparação das amostras e do equipamento utilizado, além do auxílio na escolha dos parâmetros do teste. As amostras tiveram as superfícies preparadas no Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais da Universidade Federal do Espírito Santo. Os procedimentos para preparação das superfícies iniciaram-se com um lixamento juntamente com água, onde foram utilizadas lixas de 600, 800 e 1000, e após houve polimento com abrasivo de 1 µm. Ao final de cada etapa as amostras eram lavadas e utilizava-se álcool sobre as superfícies para facilitar a evaporação da água. As amostras eram conservadas em estufas.

Com o intuito de analisar uma maior área das amostras, foram realizados 3 riscos com cargas normais distintas entre si e constantes durante o teste, com magnitude de 5N, 12N e 19N, e para cada amostra houve três repetições do processo de riscamento em regiões aleatórias da amostra, totalizando 9 riscos sobre cada amostra. A velocidade definida para o indentador foi de 0,2 mm/s, e o comprimento de cada risco com cargas diferentes foi de 5 mm, com espaçamento de 1 mm entre os riscos.

4.2 Análise dos Riscos

Para obtenção da dureza ao risco é necessário medir a largura dos riscos, e para isso segundo a norma ASTM G 171-3 deve-se utilizar o método de microscopia óptica. Contudo, através de análise de trabalhos anteriores sobre o mesmo ensaio em questão, verificou-se a necessidade da utilização de uma análise topográfica através da perfilometria, pois a baixa profundidade de foco do microscópio óptico torna difícil a visualização das bordas do risco em amostras de alta dureza ou em cargas baixas (MARTINS, 2013).

Para este trabalho uma diferente metodologia foi utilizada, onde as amostras foram levadas ao Analisador Tridimensional TalySurf CLI 1000 – 3D Surface Profiling Systems do fabricante Taylor Hobson Precision (Figura 15) e para cada um dos riscos foram gerados aproximadamente 20 perfis para a obtenção da topografia do risco, como mostrado na Figura 16 (para análise dos dados foi utilizado o software *Talysmap* 4.1, do mesmo fabricante). A partir desta topografia os perfis traçados foram sobrepostos a fim da obtenção de um perfil médio para caracterizar cada risco realizado. Como houveram três repetições dos riscos realizados foi possível estabelecer que cada amostra tivesse 3 perfis médios para cada uma das três cargas normais.

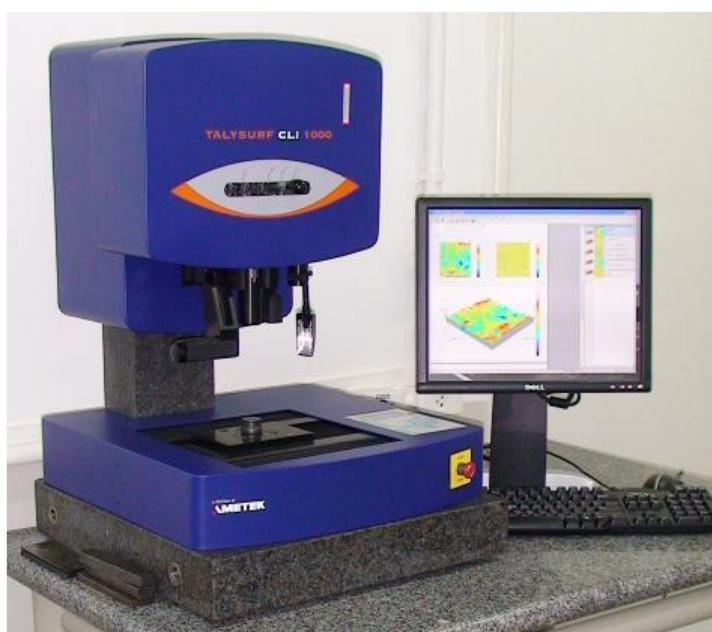


Figura 15 – Analisador Tridimensional TalySurf CLI 1000 – 3D Surface profiling Systems do fabricante Taylor Hobson Precision, Laboratório de Caracterização da Superfície dos Materiais, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo

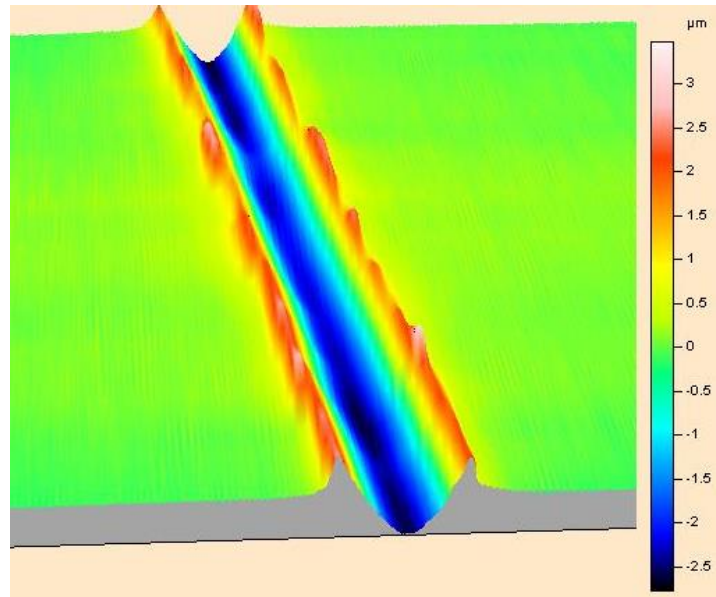


Figura 16 – Amostra T14, sob carga de 19N, na 1ª repetição.

A partir da seção transversal média é possível determinar a largura dos riscos medida de pico a pico (Figura 17), para o cálculo do valor de dureza ao risco utilizando a equação 4. Para melhor exemplificar a forma como foram realizadas as leituras é apresentado a Tabela 8 da amostra T16.

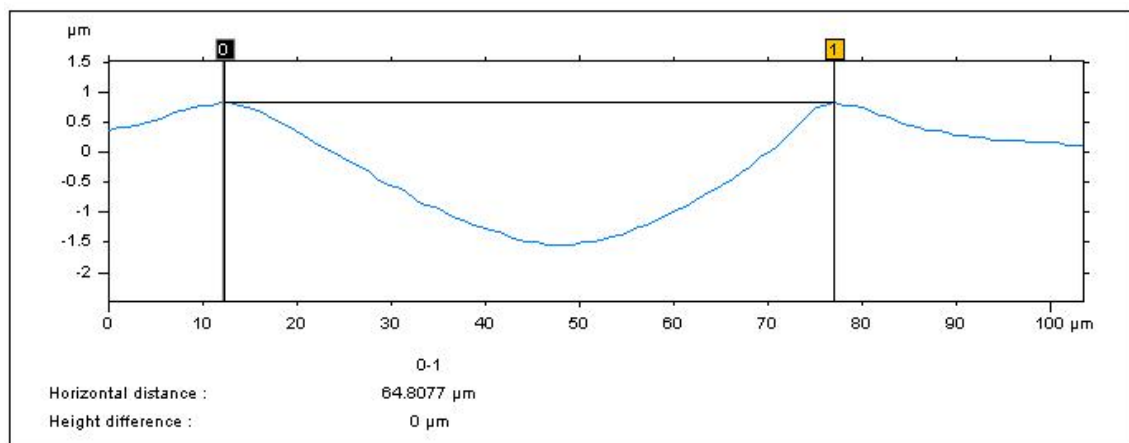


Figura 17 – Medida da Largura de um risco da Amostra T2, sob carga de 12N, na 1ª repetição.

Tabela 8 – Largura dos riscos da Amostra T16

Amostra T16		5N	12N	19N
Repetição	1ª	46,4032 μm	61,7674 μm	76,6605 μm
	2ª	50,8435 μm	59,3221 μm	75,054 μm
	3ª	46,3424 μm	59,7389 μm	75,8006 μm

Para o cálculo do fator f_{ab} , é necessário medir a área de material removido do sulco e a área de material deslocado para as laterais, como mostra a Figura 18. A Tabela 9 exemplifica a forma como foram organizados os dados obtidos das áreas da amostra T5. O fator f_{ab} é calculado segundo a equação 2, apresentada no capítulo 3, no item 3.3.4.

Para obtenção dos resultados é retirado uma média e desvio padrão entre as repetições para melhor caracterizar as amostras. É possível através dos parâmetros utilizados, verificar uma área maior da amostra e poder descobrir se existe a influência dos precipitados de segunda fase sobre a matriz do revestimento, em relação aos dados calculados no ensaio de esclerometria linear.

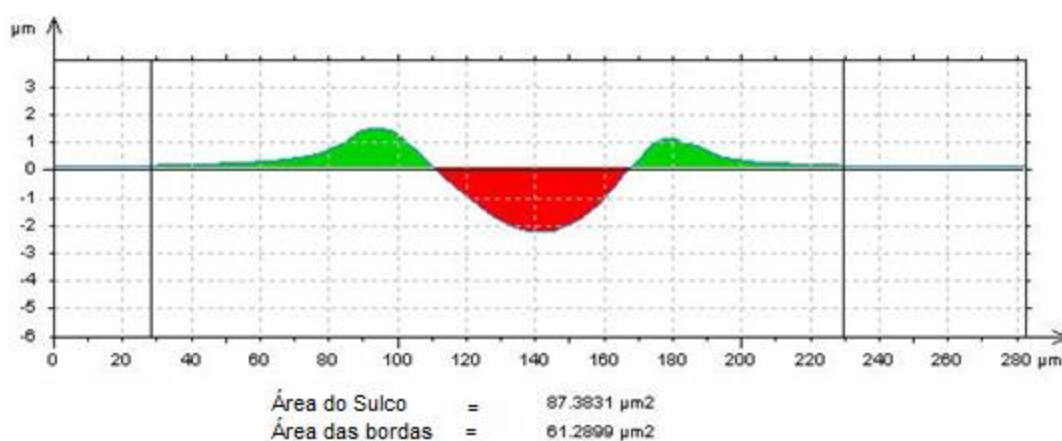


Figura 18 – Determinação das áreas A_v , A_1 e A_2 do risco da Amostra T10, sob carga de 19N, na 2ª repetição.

Tabela 9 – Medida das áreas da amostra T5.

Amostra T5		5N		12N		19N	
		A_v	$A_1 + A_2$	A_v	$A_1 + A_1$	A_v	$A_1 + A_2$
Repetição	1ª	13,2898 μm^2	12,1588 μm^2	39,3002 μm^2	34,1177 μm^2	72,2122 μm^2	61,3273 μm^2
	2ª	14,8696 μm^2	13,3575 μm^2	40,2627 μm^2	37,0712 μm^2	78,4278 μm^2	78,0471 μm^2
	3ª	14,2009 μm^2	12,5016 μm^2	43,2223 μm^2	42,5866 μm^2	77,4613 μm^2	62,3469 μm^2

4.2.1 Análise de Variância

Com base nos dados calculados e em uma análise prévia, foi necessário a utilização de um método estatístico sobre os resultados. Escolhido de forma a gerar um simples estudo, utilizou-se a análise de variância (ANOVA) com objetivo de verificar se existe diferença significativa entre as médias dos valores calculados para os riscos.

A análise de variância é um teste estatístico amplamente difundido, e visa fundamentalmente verificar se ocorre uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. Os fatores propostos podem ser de origem qualitativa ou quantitativa, mas a variável dependente necessariamente deve ser contínua. Esse teste foi realizado com auxílios de softwares estatísticos e planilhas, por isso não houve um aprofundamento desta técnica neste trabalho.

A principal aplicação da ANOVA é a comparação de médias oriundas de grupos diferentes. Esta análise é utilizada sobre os resultados de dureza ao risco das amostras, com a finalidade de descobrir a influência da mudança de carga sobre o valor médio obtido. Através disso, foram formados grupos para a análise contendo os valores calculados a partir do perfil médio nas três repetições de risco sobre cada amostra, e separados a partir da carga normal aplicada. Segue na Tabela 10 o exemplo utilizado para montagem da planilha a ser analisada para uma das amostras.

Tabela 10 – Grupos formados para análise de variância.

ANOVA	Repetição	Carga (N)	Amostra	Dureza ao Risco Perfil Médio (Pa)
Grupo 1	1 ^a	12	T2	7274084643
	2 ^a	12	T2	6879696394
	3 ^a	12	T2	5942102145
Grupo 2	1 ^a	19	T2	7315562204
	2 ^a	19	T2	6583017783
	3 ^a	19	T2	5754268084

Os resultados para a carga normal de 5N foram excluídos dessa análise por apresentarem diferença nítida nos resultados de dureza ao risco médio em relação as outras cargas, sendo melhor explicado no tópico de Resultados e Discussões.

A análise consiste no objetivo de descobrir quais amostras possuíram estatisticamente a mesma média entre os grupos para os valores de dureza ao risco, já que a mudança da carga aplicada diferencia os grupos (Tabela 10). Os valores de dureza dependem das características de um material, e não dos fatores utilizados no ensaio, por isso o esperado é que estatisticamente os grupos possuem significativamente a mesma média.

Para este caso foi aplicado o teste de hipóteses, através de uma comparação entre as médias de dureza de ao risco dos grupos de cada amostra pelo teste de Tukey, utilizando o software *Minitab*. A hipótese assumida para o teste foi de que os grupos possuíam estatisticamente médias iguais (H_0 – Hipótese Nula), e caso o efeito de mudança de carga fosse significativo, ocorria a alteração para a hipóteses de que eram diferentes estatisticamente.

Para validar ou não a hipótese, é analisado o *p-value* de cada comparação entre as médias. O *p-value* é a probabilidade de se obter uma estatística de teste igual ou mais extrema da qual é observada. Partindo de um nível de significância (α) de 5%, caso o *p-value* fosse maior do que α , a hipótese nula (H_0) era aceita, e vice-versa. Sendo α a probabilidade de se cometer o erro de se rejeitar a hipótese nula quando a mesma é verdadeira. Os dados obtidos através dessa metodologia, empregados no software estatístico encontram-se no Anexo, e os resultados obtidos são discutidos no próximo capítulo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os ensaios de esclerometria linear finalizados e todas as informações sobre os riscos coletadas, são calculados a Dureza ao Risco e o Coeficiente f_{ab} , para classificação das amostras quanto a resistência na deformação do contato e caracterização do micromecanismos de desgaste, respectivamente.

5.1 Dureza ao risco

Através da utilização da metodologia apresentada para realização dos ensaios, os dados de largura dos riscos são medidos. A equação (5) é utilizada para o cálculo da dureza ao risco das amostras e são representadas através da Tabela 11, os valores médios entre as repetições com os respectivos desvios padrões.

Tabela 11 – Dureza ao risco médio das amostras

Amostra	Dureza ao Risco (GPa)		
	5N	12N	19N
T2	5,653 ± 0,817	6,698 ± 0,684	6,551 ± 0,781
T3	5,843 ± 0,331	7,042 ± 0,321	6,909 ± 0,315
T4	6,219 ± 0,414	7,311 ± 0,734	7,078 ± 0,841
T5	5,922 ± 0,019	7,000 ± 0,469	7,593 ± 0,095
T6	5,735 ± 0,032	8,151 ± 0,02	7,530 ± 0,065
T8	6,829 ± 0,381	7,905 ± 0,555	7,364 ± 0,225
T10	6,287 ± 0,085	7,440 ± 0,349	7,248 ± 0,413
T13	6,001 ± 0,274	7,420 ± 0,104	7,597 ± 0,126
T14	5,399 ± 0,204	6,767 ± 0,165	6,558 ± 0,056
T16	5,480 ± 0,058	6,722 ± 0,091	6,280 ± 0,377
T17	5,583 ± 0,059	7,156 ± 0,321	6,783 ± 0,205
T18	7,420 ± 0,123	8,812 ± 0,186	8,419 ± 0,606

A Figura 19 apresenta um gráfico comparativo entre os valores médios de dureza ao risco das amostras com os respectivos desvios padrões.

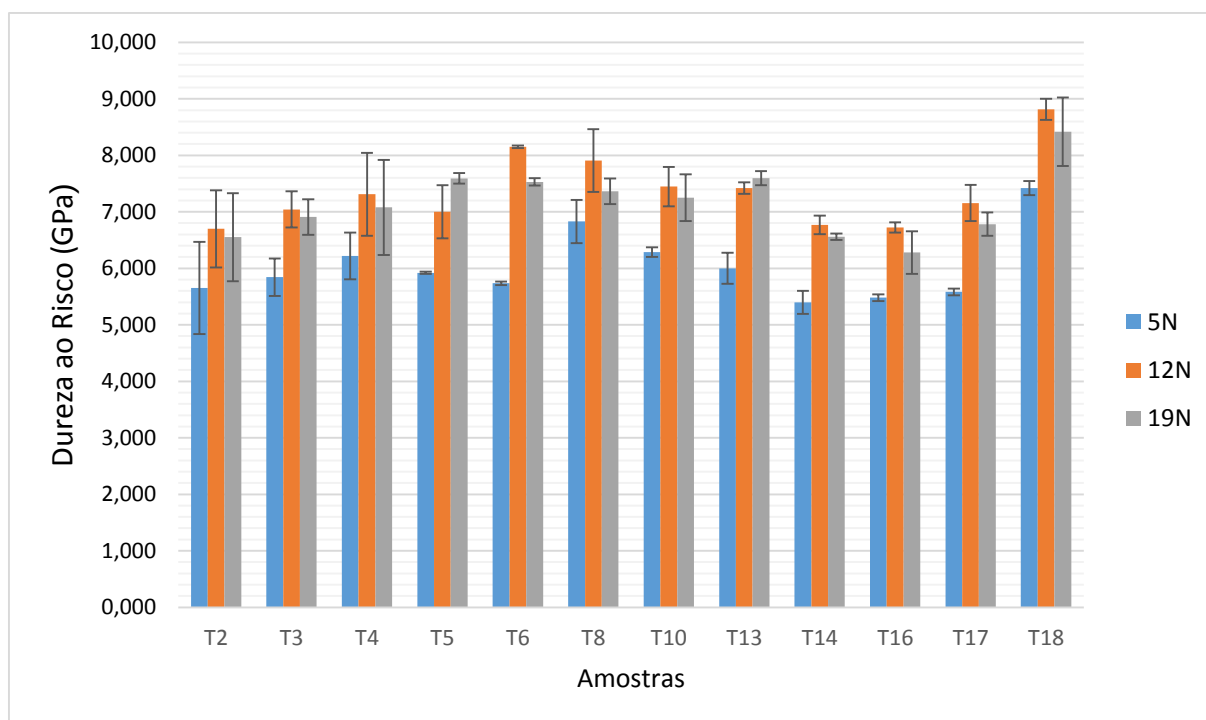


Figura 19 – Gráfico comparativo dos valores médios de dureza ao risco das amostras.

Na maioria das amostras foi possível verificar que para as cargas de 5N o valor encontrado foi menor em relação à média das outras cargas. Isso pode ser explicado pela dificuldade de obtenção dos perfis médios para esta carga, devido à baixa deformação aparente em alguns pontos. A respeito do valor de dureza ao risco, optou-se por excluir da discussão os resultados para a carga de 5N.

Analisando a Figura 19, foi possível verificar, que valores mais próximos de dureza ao risco ocorreram entre as cargas de 12N e 19N. Buscando compreender a relevância desta igualdade foi proposto a análise de variância (ANOVA).

Inicialmente foi realizado uma análise por regressão envolvendo todas as amostras, e foi possível verificar que as médias de dureza ao risco se alteraram apenas mudando a amostra nos ensaios, conforme a Figura 20. Com isso é possível validar que as amostras possuem características diferentes baseando-se em parâmetros do processo de produção. Também foi possível verificar a diferença dos resultados para as cargas de 5N, confirmando a exclusão na discussão dos resultados para esta carga.

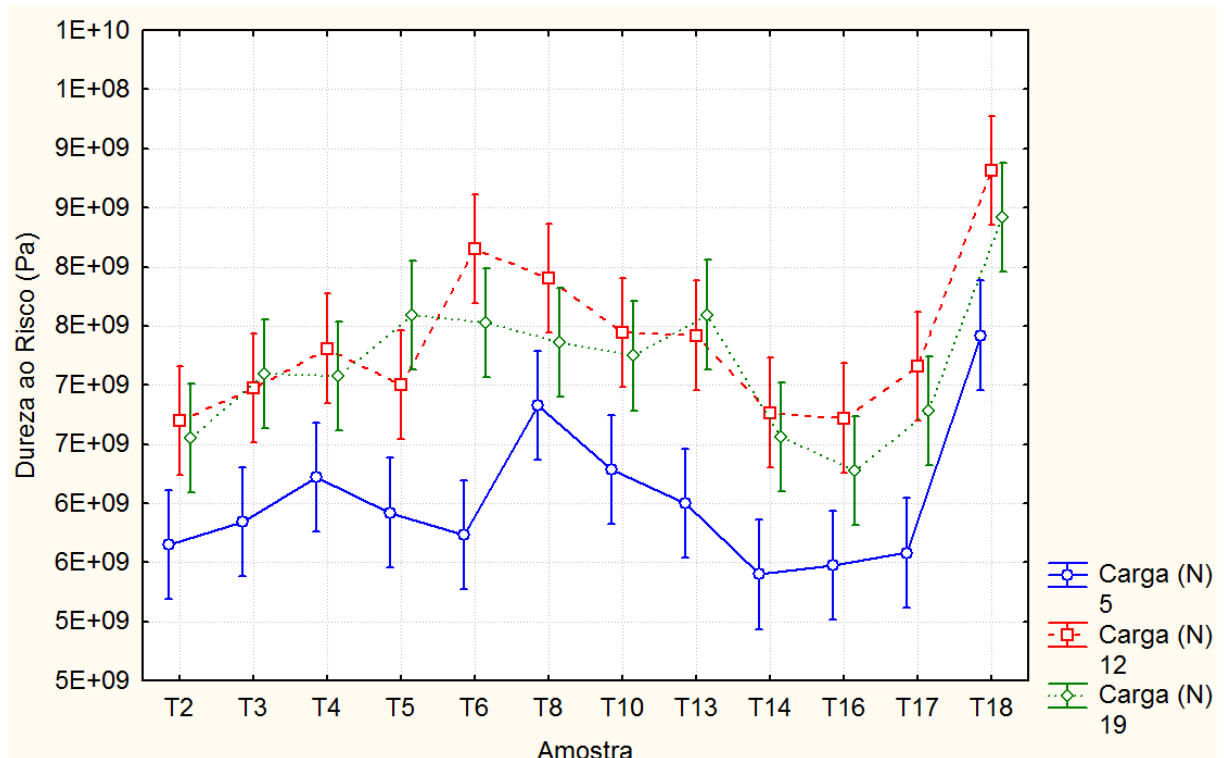


Figura 20 – Análise de variância entre as amostras.

Através da Figura 20, foi possível verificar certa relevância entre os valores médios de dureza ao risco dentro da mesma faixa de variância, alterando-se a carga de 12N e 19N. Para comprovar se as amostras possuíam estatisticamente as médias iguais de dureza ao risco entre as cargas de 12N e 19N, foram realizados teste de comparação entre médias, conforme descrito na metodologia.

Os dados obtidos do software estatístico se encontram no Anexo. Avaliando os dados foi possível obter os resultados de que apenas a amostra T6, apresentou diferença significativa ao alterar o efeito da carga normal no ensaio de esclerometria e que no restante das amostras foi possível verificar a hipótese de que as cargas, estatisticamente, não alteram significativamente os valores médios de dureza ao risco. Uma possível explicação para que a amostra T6 tenha apresentado diferença seria o *Size Effect*, em que a dureza pode diminuir com o aumento da carga, mas é necessário uma investigação mais profunda sobre este efeito. A amostra T6 apresentou menor desvio padrão dos resultados, e um valor relativamente alto, posicionando-se entre as amostras de maior dureza ao risco. Outra amostra que apresentou alta dureza ao risco foi a amostra T18, para a qual não houve influência na mudança de carga normal aplicada.

As amostras T6 e T18 fazem parte da liga Inconel 686 e em comparação com a Tabela 6, apresentam a maior fração de precipitado da área total da amostra no ultimo cordão de solda. Na Figura 21, é apresentado uma comparação entre a dureza média ao risco para a carga normal de 12N com a fração de precipitados de todas as amostras no ultimo cordão de solda.

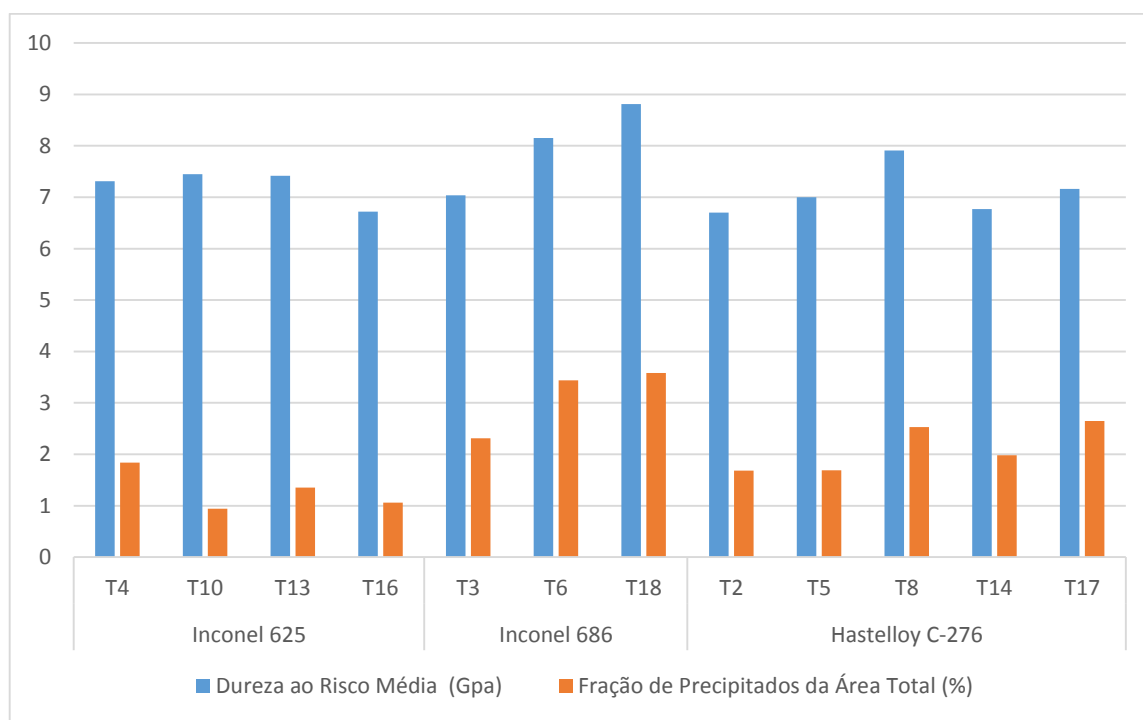


Figura 21 – Gráfico de comparação entre a dureza média ao risco para a carga normal de 12N com a fração de precipitados da área total de todas as amostras.

É possível verificar que a liga Inconel 686 destaca-se das outras ligas, pois apresenta tendência a uma relação crescente entre a fração de precipitados da área total da amostra com a dureza ao risco média. Nas outras ligas não é possível afirmar essa relação, devido a algumas amostras que obtiveram comportamento diferente. Igual resultado é verificado em comparação com a carga normal de 19 N, mesmo a amostra T6 apresentando significância ao alterar a carga.

A figura 22 mostra a relação da fração de precipitados com os valores de dureza ao risco através de um gráfico de dispersão. É possível verificar certa tendência dos resultados para maioria das amostras o aumento do valor de dureza ao risco aumentando com o aumento da fração de precipitados, mesmo com pontos que se distanciam da linearidade.

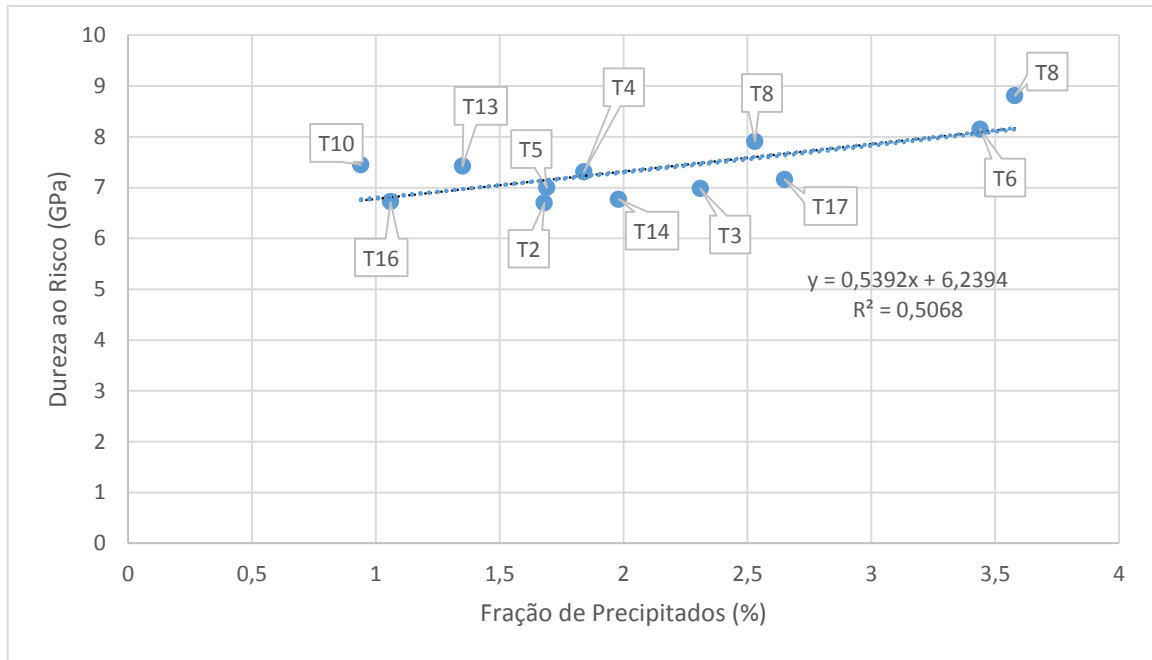


Figura 22 - Gráfico de dispersão com a tendência entre a fração de precipitados e o valor de dureza ao risco das amostras, para a carga de 12N

Silva (2010) concluiu que a fração de precipitados dessas amostras dependem principalmente do tipo de liga e do nível de energia de soldagem aplicado. As amostras T3, T6 e T18 que são amostras de Inconel 686, obtiveram relação crescente também na energia de soldagem utilizada, conforme a Tabela 5.

A dureza ao risco é um parâmetro relacionado com o comportamento plástico de um material, é comum esperar que exista uma relação direta entre dureza ao risco e dureza Vickers (convencional), ou mesmo que estas sejam iguais. Na prática, esses dois parâmetros são raramente iguais e a razão entre eles apresenta uma grande diversidade de valores para diferentes materiais. Williams (1996) demonstra grande diversidade de valores para essa razão. Neste trabalho também é possível verificar analisando os resultados de dureza ao risco para as cargas de 12N com os da Tabela 7, mostrado na Figura 23. Afirmando a grande complexidade dos mecanismos de deformação plástica atuantes durante o ensaio de esclerometria linear e como as características mecânicas, microestruturais e superficiais influenciam nos resultados de tal ensaio.

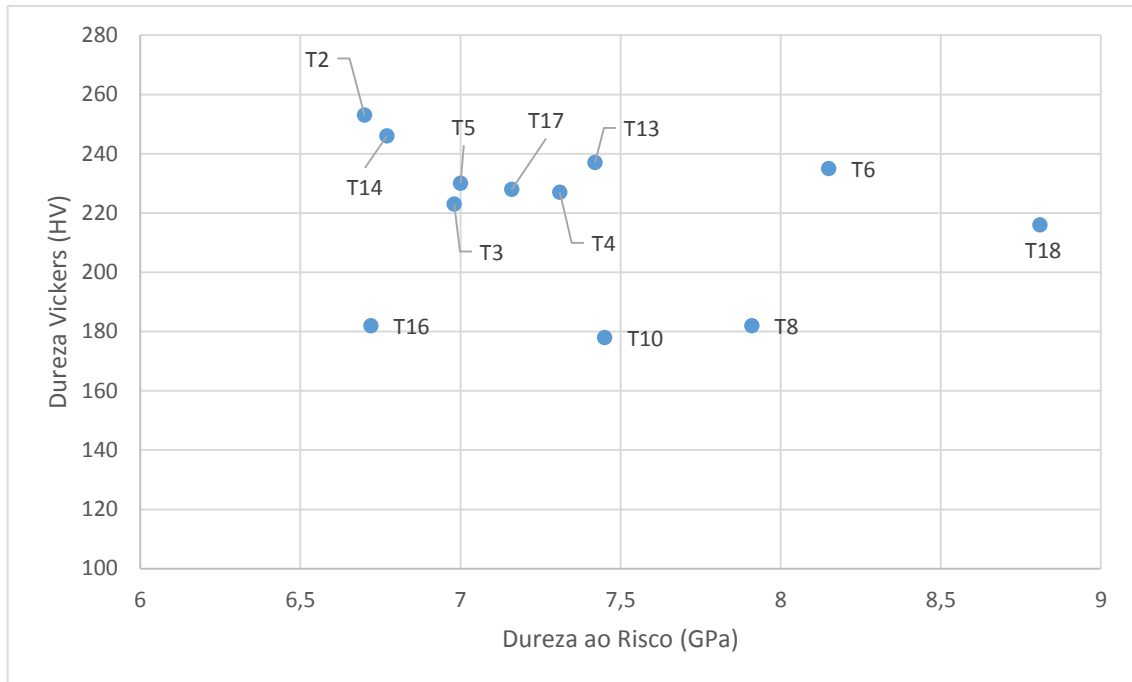


Figura 23 - Comparação entre os valores de Dureza ao Risco para a carga de 12N e Dureza Vickers das amostras.

A dureza convencional é um parâmetro de grande importância no que se refere à resistência de determinado material à abrasão. Entretanto, não é o único parâmetro, determinante. Devem ser levados em conta fatores como propriedades do elemento abrasivo e mecanismos de deformação (HUTCHINGS,1992). Assim comparação de diferentes tipos de amostra quanto ao desgaste abrasivo não deve ser baseada apenas em seus valores de dureza convencional.

A dureza ao risco também não é um parâmetro determinante da resistência à abrasão de um material. Apesar de a esclerometria linear ser a simulação de um monoevento abrasivo, o desgaste abrasivo em si envolve mecanismos muito mais complexos.

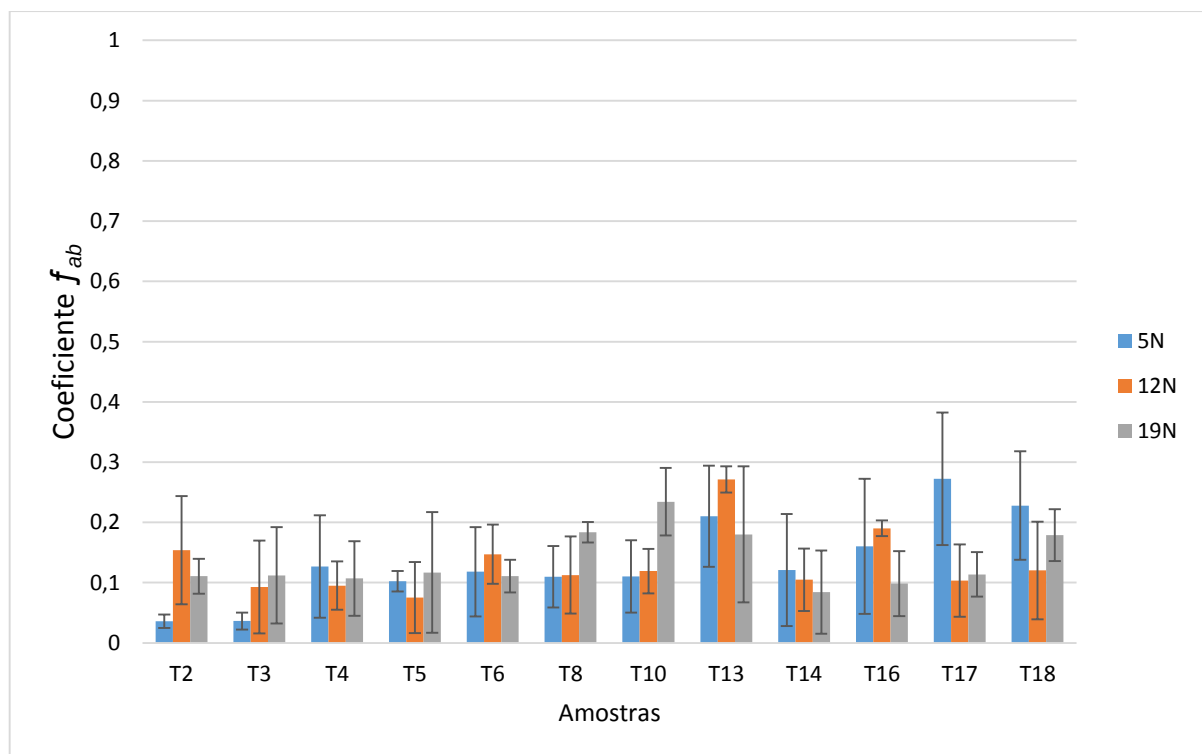
5.2 Coeficiente f_{ab}

Seguindo a metodologia apresentada, as áreas foram medidas para cada perfil médio de cada repetição de um risco, e o Coeficiente f_{ab} foi calculado através da equação (2), com isso foram obtidas as médias entre as repetições. Os valores médios juntamente do desvio padrão para cada carga aplicada são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Coeficiente f_{ab} médio das amostras

Amostra	Coeficiente f_{ab}		
	5N	12N	19N
T2	0,04 ± 0,01	0,15 ± 0,09	0,11 ± 0,03
T3	0,04 ± 0,01	0,09 ± 0,08	0,11 ± 0,08
T4	0,13 ± 0,09	0,10 ± 0,04	0,11 ± 0,06
T5	0,10 ± 0,02	0,08 ± 0,06	0,12 ± 0,10
T6	0,12 ± 0,07	0,15 ± 0,05	0,11 ± 0,03
T8	0,11 ± 0,05	0,11 ± 0,06	0,18 ± 0,02
T10	0,11 ± 0,06	0,12 ± 0,04	0,23 ± 0,06
T13	0,21 ± 0,08	0,27 ± 0,02	0,18 ± 0,11
T14	0,12 ± 0,09	0,10 ± 0,05	0,08 ± 0,07
T16	0,16 ± 0,11	0,19 ± 0,01	0,10 ± 0,05
T17	0,27 ± 0,11	0,10 ± 0,06	0,11 ± 0,04
T18	0,23 ± 0,09	0,12 ± 0,08	0,18 ± 0,04

A Figura 22 apresenta um gráfico comparativo entre os valores médios do coeficiente f_{ab} das amostras com os respectivos desvios padrões.

Figura 24 – Gráfico comparativo dos valores médios do coeficiente f_{ab} das amostras.

Verificando a Figura 22, é possível perceber pequenos valores para o coeficiente f_{ab} quando comparados ao valor máximo de 1, que é quando ocorre predominância do microcorte. Na maioria, as amostras não apresentaram destaque entre si, principalmente devido aos baixos valores do coeficiente. Os valores dos desvios padrões relativamente grandes em função dos pequenos valores médios deduzem uma diferença entre as regiões onde foram realizadas as repetições, mas isso não pode ser concluído devido à diferença entre alguns valores.

Através dos coeficientes calculados, mesmo não havendo destaque entre as amostras, podemos verificar a tendência de predominância do microsulcamento em todas as amostras analisadas, com algumas amostras apresentando um pequeno percentual de material removido devido ao microcorte.

6 CONCLUSÃO

Após os resultados, algumas conclusões podem ser obtidas ao final deste trabalho:

- A análise de variância mostrou que a dureza ao risco não dependeu em sua grande maioria da carga aplicada.
- Através da análise de variância de comparação entre médias, foi verificado que a amostra T6 apresentou significância no valor de dureza ao risco mudando a carga normal aplicada.
- Cargas de 5N foram insuficientes para obtenção de resultados coerentes de dureza ao risco.
- A liga Inconel 686 no geral apresentou tendência a maiores valores de Dureza ao Risco para maiores valores de fração de precipitados da área total da amostra, facilitando sua escolha para uma possível aplicação em que os parâmetros do processo de fabricação facilitem o controle de precipitados.
- A energia de soldagem contribui para a formação de precipitados e consequente aumento do valor de dureza ao risco, principalmente na Liga Inconel 686.
- Através do coeficiente f_{ab} , foi verificado a tendência do micromecanismo predominante em todas as amostras, que foi o microsulcamento, devido aos baixos valores médios calculados para este coeficiente, com pequeno percentual de material removido entre as amostras.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios de esclerometria linear com cargas maiores para uma melhor avaliação das transições dos mecanismos de desgaste;
- Verificar com mais precisão e através de outros testes a influência de diferentes cargas no ensaio de esclerometria linear para obtenção de valores de dureza ao risco
- Realizar análise de variância entre os valores de Coeficiente f_{ab}

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM G171: Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus. 3 ed. West Conshohocken: Astm International, 2009.

ASM. Nickel and nickel alloys. In: (Ed.). Properties and selection of nonferrous alloys and special-purpose materials. Ed. ASM International. Metals Park, Ohio, v. 1, 10th 1990

BROOKS, C. R Heat treatment, structure and properties of nonferrous alloys. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1984.

FERREIRA, F. M.: Avaliação Tribomecânica via Esclerometria Retilínea e Identação Instrumentada do Aço ABNT 8550. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010. 119 f

HUTCHINGS, I. M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. London: Edward Arnold, 1992.

JOST, H. P: Lubrication (Tribology) – A Reporter of the Present Position and Industry's Needs, Dep. of Education and Science, H. M. Stationary Office, London, 1966.

JACOBSSON, S. et al.: ASM Handbook Volume 18; Friction, Lubrication and Wear Technology: Scratch Testing. Ohio: ASM International, 1992. 2235 p. (Vol.18), pp. 820-837.

MARTINS, M. A.; Avaliação do Comportamento Tribológico do aço ABNT 8550 Nitretado a Plasma e Revestido com CRN ou ALCRN por PVD através de Ensaios de Esclerometria Linear, Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, 2014, 52p

MARTINS, M. A.; Esclerometria Linear do Aço ABNT 8550. Congresso brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Aracajú, 2013.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W.: Engeneering Tribology. 2. ed.: Butterworth-Heinemann, 2001. 744 p.

SILVA, Cleiton Carvalho. Revestimentos de liga de níquel depositados pelo processo TIG com alimentação de arame frio - aspectos operacionais e metalúrgicos. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciências dos Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010. 325f

SILVA, Cleiton Carvalho: Comportamento abrasivo de revestimentos de superligas a base de níquel resistentes à corrosão. 6º Congresso Brasileiro de engenharia de fabricação, 2011. 12f.

SIMS, C.T. **Superalloys: genesis and character**. In: Sims. C. T., Stoloff, N. S. e Hagel, W. C.(Ed.). Superalloys II: John Wiley & Sons., 1978

STROUD, M. F.; WILMAN, H.. **The proportion of the groove volume removed as wear in abrasion of metals**. Brit. J. Appl. Phys., London, v. 13, p.173-178. 1962.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W.: **Engeneering Tribology**. 2. ed.: Butterworth-Heinemann, 2001. 744 p.

ZUM GAHR, K.: **Microstructure and Wear of Materials**. Amsterdam: Elsevier, 1987. 560 p.

WILLIAMS, J. A.: **Analytical Modes of Scratch Hardness**. Tribology International, v. 29, n. 8, p.675-694, 1996.

9 ANEXO

Segue abaixo a descrição obtida dos testes de comparação entre médias, a partir de software estatístico:

Amostra T2-12N; Amostra T2-19N

Paired T for Amostra 2-12 - Amostra 2-19_1

	N	Mean	StDev	SE Mean
Amostra 2-12	3	6698627727	684202996	395024784
Amostra 2-19_1	3	6550949357	781140909	450991914
Difference	3	147678370	172617377	99660689

95% CI for mean difference: (-281126965; 576483705)

T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = 1,48 P-Value = 0,277

Amostra 3T-12N; Amostra 3T-19N

Paired T for Amostra 3-12 - Amostra 3-19_1

	N	Mean	StDev	SE Mean
Amostra 3-12	3	6977344098	427354411	246733184
Amostra 3-19_1	3	7096086082	624047577	360294037
Difference	3	-118741985	740413107	427477707

95% CI for mean difference: (-1958030107; 1720546137)

T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -0,28 P-Value = 0,807

Amostra T4-12N; Amostra T4-19N

Paired T for Amostra 4-12 - Amostra 4-19_1

	N	Mean	StDev	SE Mean
Amostra 4-12	3	7311243238	733656875	423576994
Amostra 4-19_1	3	7077918787	840933898	485513412
Difference	3	233324451	358398277	206921342

95% CI for mean difference: (-656986224; 1123635126)

T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = 1,13 P-Value = 0,377

Amostra T5-12N; Amostra T5-19N

Paired T for Amostra 5-12 - Amostra 5-19_1

	N	Mean	StDev	SE Mean
Amostra 5-12	3	7000140349	469935145	271317183
Amostra 5-19_1	3	7593080761	94804550	54735432
Difference	3	-592940412	504925830	291519064

95% CI for mean difference: (-1847245708; 661364885)
 T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -2,03 P-Value = 0,179

Amostra T6-12N; Amostra T6-19N

Paired T for Amostra 6-12 - Amostra 6-19_1

	N	Mean	StDev	SE Mean
Amostra 6-12	3	8150873205	20448422	11805902
Amostra 6-19_1	3	7530490695	64678776	37342309
Difference	3	620382510	52759081	30460470

95% CI for mean difference: (489321687; 751443333)
 T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = 20,37
P-Value = 0,002

Amostra T8-12N; Amostra T8-19N

Paired T for Amostra 8-12 - Amostra 8-19_1

	N	Mean	StDev	SE Mean
Amostra 8-12	3	7905223321	555294644	320599512
Amostra 8-19_1	3	7364462443	225393355	130130914
Difference	3	540760878	686068691	396101943

95% CI for mean difference: (-1163528229; 2245049986)
 T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = 1,37 P-Value = 0,305

Amostra T10-12N; Amostra 10-19N

Paired T for Amostra 10-12 - Amostra 10-12_1

	N	Mean	StDev	SE Mean
Amostra 10-12	3	7446202103	349792800	201952967
Amostra 10-12_1	3	7247867374	413381040	238665654
Difference	3	198334729	184832854	106713298

95% CI for mean difference: (-260815534; 657484992)
 T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = 1,86 P-Value = 0,204

Amostra T13-12N; Amostra T13-19N

Paired T for Amostra 13-12 - Amostra 13-19_1

	N	Mean	StDev	SE Mean
Amostra 13-12	3	7420238511	104395829	60272960
Amostra 13-19_1	3	7596605925	126383753	72967694
Difference	3	-176367414	228590639	131976867

95% CI for mean difference: (-744218042; 391483214)
 T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -1,34 P-Value = 0,313

Amostra T14-12N; Amostra T14-19N

Paired T for Amostra 14-12 - Amostra 14-19_1

	N	Mean	StDev	SE Mean
Amostra 14-12	3	6767456624	165256824	95411072
Amostra 14-19_1	3	6557967861	55708119	32163097
Difference	3	209488763	216196416	124821059

95% CI for mean difference: (-327572906; 746550433)

T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = 1,68 P-Value = 0,235

Amostra T16-12N; Amostra T16-19N

Paired T for Amostra 16-12 - Amostra 16-19_1

	N	Mean	StDev	SE Mean
Amostra 16-12	3	6722035397	90726653	52381057
Amostra 16-19_1	3	6279518968	377198915	217775895
Difference	3	442516429	313005815	180713991

95% CI for mean difference: (-335033119; 1220065977)

T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = 2,45 P-Value = 0,134

Amostra T17-12N; Amostra T17-19N

Paired T for Amostra 17-12 - Amostra 17-19_1

	N	Mean	StDev	SE Mean
Amostra 17-12	3	7156198893	320779138	185201921
Amostra 17-19_1	3	6782591604	205376841	118574375
Difference	3	373607289	469170525	270875729

95% CI for mean difference: (-791876905; 1539091484)

T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = 1,38 P-Value = 0,302

Amostra T18-12N; Amostra T18-19N

Paired T for Amostra 18-12 - Amostra 18-19_1

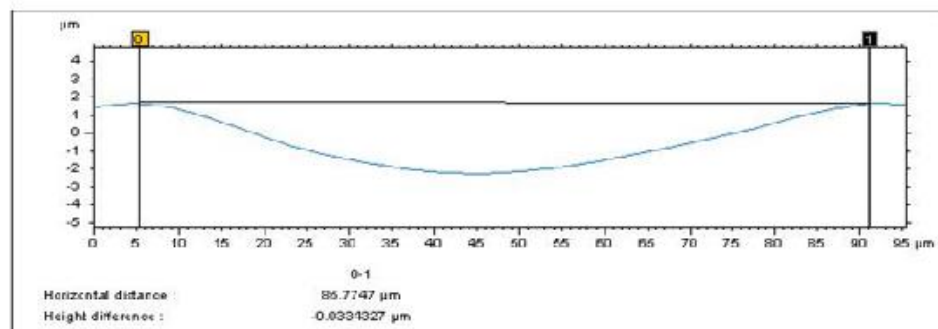
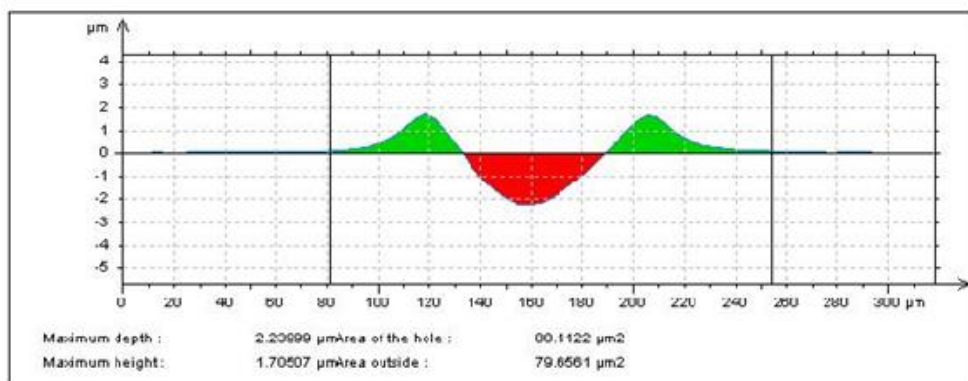
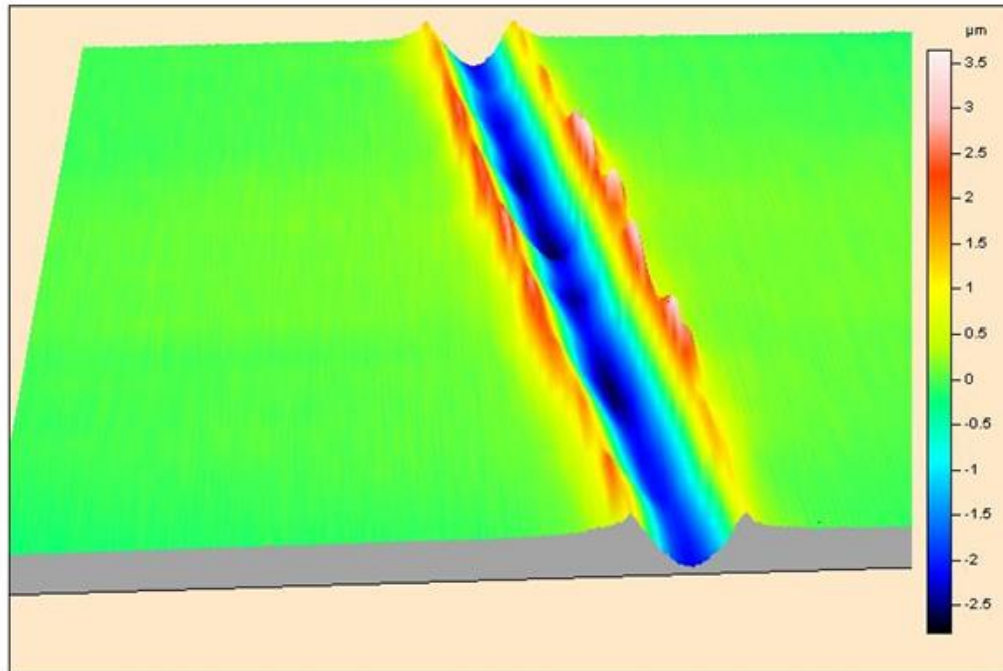
	N	Mean	StDev	SE Mean
Amostra 18-12	3	8812360719	186412760	107625457
Amostra 18-19_1	3	8418522333	606213060	349997273
Difference	3	393838385	510630904	294812890

95% CI for mean difference: (-874639101; 1662315871)

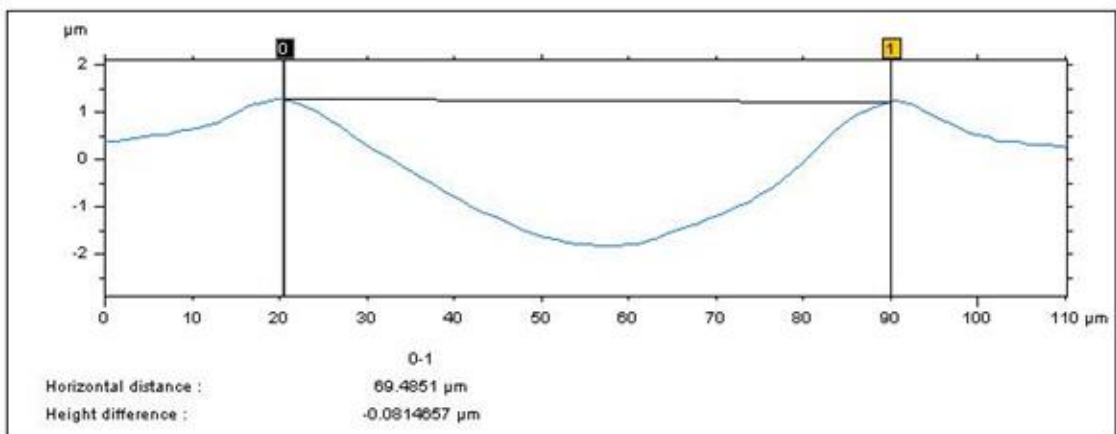
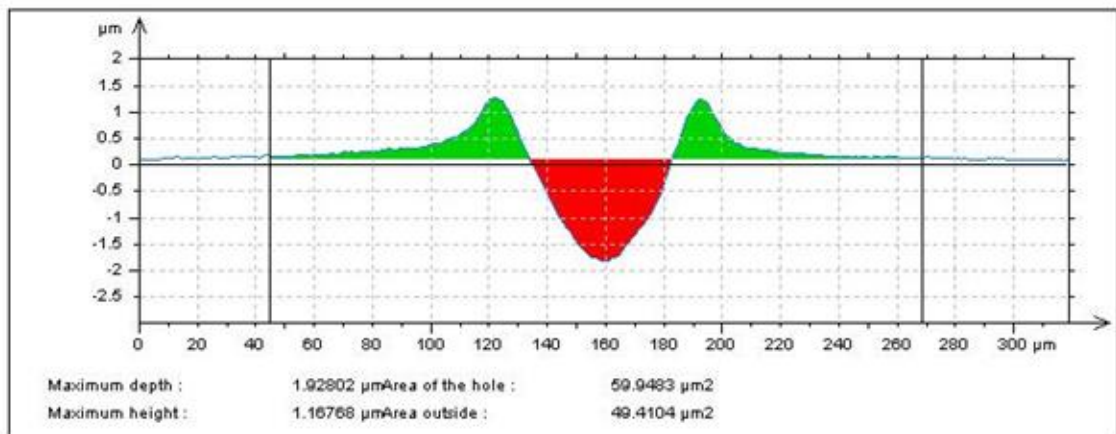
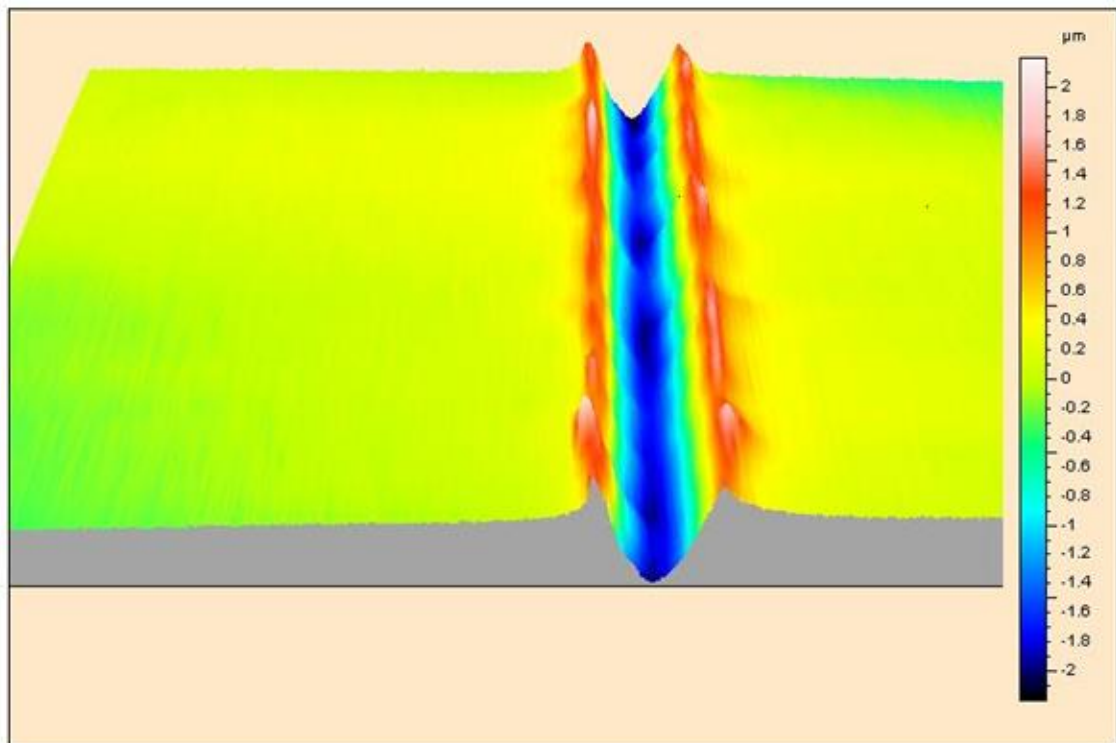
T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = 1,34 P-Value = 0,313

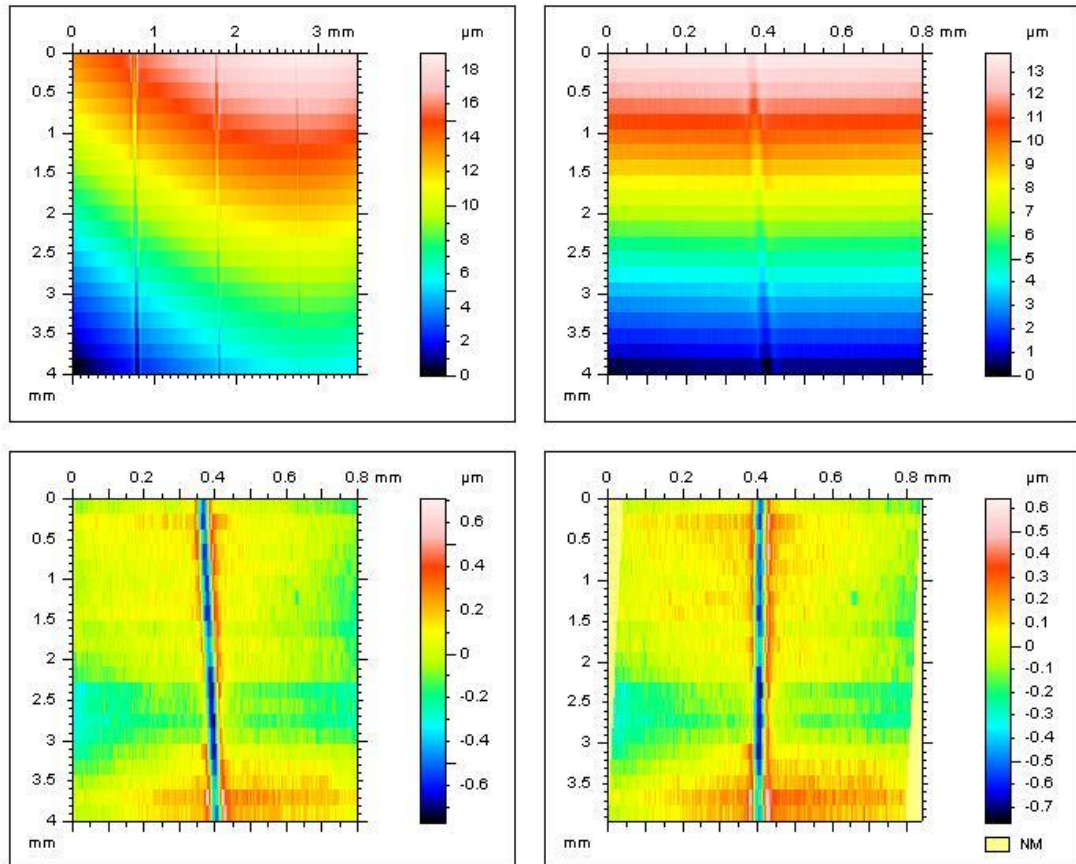
É apresentado algumas imagens obtidas pelo software TalyMap Gold 4.1 do Laboratório de Caracterização da Superfície dos Materiais da Universidade Federal do Espírito Santo e que serviram de base para a obtenção dos dados de cada amostra

Amostra 14, 3ª repetição, carga de 19N



Amostra 16, 3ª repetição, carga de 12 N



Amostra T18, 2ª repetição, carga de 5N**Carga de 5N**