



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Caracterização Mecânica e Tribológica de Papéis para Uso Pessoal

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na
Especialidade de Produção e Projecto

Mechanical and Tribological Characterization of Papers for Personal Use

Autor

Luís André Pedrosa Afonso

Orientadores

Luís Miguel Cardoso Vilhena Pereira da Silva

Amílcar Lopes Ramalho

Júri

Presidente	Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor Luís Miguel Cardoso Vilhena Pereira da Silva Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra Professor Doutor Pedro Alexandre de Almeida do Vale Antunes Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2017

“Whatever you do, do it well.”

Walt Disney

“Simplicity is the ultimate sophistication.”

Leonardo da Vinci

Em memória do meu avô, João Francisco Pedrosa.

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Luís Vilhena, por todo o apoio dado e por todo o conhecimento que me transmitiu, estando disponível sempre que fosse necessário. Apesar de não nos conhecermos anteriormente ao início desta dissertação de mestrado, sinto que foi um dos melhores orientadores que eu poderia ter.

Ao Professor Doutor Amílcar Ramalho, por todo o apoio dado e por todo o conhecimento transmitido, quer ao longo da dissertação de mestrado, quer também em todas as unidades curriculares que me leccionou.

No fundo, quero agradecer aos meus dois orientadores, por terem contribuído de uma forma bastante significativa na minha formação enquanto engenheiro mecânico, e por me abordarem sempre com simpatia e respeito.

Quero também deixar uma palavra de agradecimento para com o Doutor Manuel Evaristo pela disponibilização dos sais, e de todo o procedimento necessária para o controlo de humidade relativa nos diferentes tipos de papel.

Aos meus pais, Ana Paula e André, por todo o apoio e educação que me dão, e também por não me faltar nada de muito importante.

Aos meus irmãos, Catarina, João e Carolina, por me apoiarem e pelos bons momentos vividos. A Carolina ainda vai ter que esperar alguns anos até conseguir ler este agradecimento.

A toda a minha família, por todos os momentos inesquecíveis, e também por todo o apoio que me foi dado sempre que necessitei. De salientar a família Pedrosa, que os meus avós João e Prazeres construíram, na medida em que a união desta família deixa-me bastante feliz.

A todos os meus amigos, por todos os bons momentos de amizade e festa passados, mas também de trabalho, esperando que assim continue a ser.

Por último, quero dizer que me sinto extremamente agradecido por ter feito parte da vida do meu avô João, de quem eu aprendi muito e, acima de tudo, ficam as memórias de uma pessoa muito especial e da qual eu tenho como exemplo a seguir.

Resumo

No âmbito deste trabalho, foram analisados 7 diferentes tipos de papel, 6 utilizados para higiene pessoal e um outro, o papel de impressão, que serviu como termo de comparação face a um maior número de estudos prévios existentes.

Para isso, foram determinadas as propriedades físicas destes materiais, através de ensaios de tracção e de testes de atrito. Através dos ensaios de tracção foi possível obter as seguintes propriedades mecânicas: resistência à tracção, deformação à rotura, rigidez à tracção e absorção de energia à tracção. As propriedades tribológicas foram medidas, nomeadamente o coeficiente de atrito. O atrito foi determinado através de uma sonda de medição portátil baseada num sensor de força de 2 eixos, em que a força normal e a força tangencial foram medidas. Também a espessura e a gramagem dos vários tipos de papel foram medidas.

Posteriormente, foram realizados questionários de percepção táctil, onde 29 voluntários (10 do sexo feminino e 19 do sexo masculino) avaliaram os diferentes tipos de papel numa escala háptica de 1 a 5, e de acordo com as seguintes qualidades: suave-áspero; macio-duro; escorregadio-aderente e agradável-desagradável. De modo a uniformizar esta escala, foram utilizados materiais de referência. Além disso, os voluntários estavam impossibilitados de visualizar os materiais que estavam a avaliar.

Por comparação entre as propriedades físicas com as qualidades tácteis, foi possível concluir que o coeficiente de atrito está fortemente correlacionado com as sensações de suavidade e de agradabilidade ao toque. Também foi encontrada uma correlação fortemente positiva entre o coeficiente de atrito e a resistência à tracção. Por outro lado, foi encontrada uma correlação fortemente negativa entre o coeficiente de atrito e a rigidez à tracção, a espessura e a gramagem.

Palavras-chave: percepção táctil, propriedades mecânicas, coeficiente de atrito, biotribologia, papel, pele humana.

Abstract

In the scope of this work, 7 different types of paper were analyzed, 6 of them are often used for personal care, while the printing paper, was used as a comparison term due to a large number of existing previous studies.

Therefore, the physical properties of this materials were determined, through tensile tests and friction tests. Through the tensile tests was possible to obtain the following mechanical properties: tensile strength, elongation, tensile stiffness and tensile energy absorption. The tribological properties were measured, namely the coefficient of friction. The friction was determined through a portable measuring probe based on a 2-axis force sensor, whereby the normal and tangential forces were measured.

After that, tactile perception questionnaires were performed, where 29 volunteers (10 males and 19 females) assessed the different types of paper on a 1 to 5 haptic scale, and according to the following qualities: soft-rough; smooth-hard; slippery-sticky and pleasant-unpleasant. In order to turn this scale uniform, reference materials were used. Furthermore, the volunteers were unable to visualize the materials that they were assess.

By comparing physical properties with tactile qualities, it was possible to conclude that the coefficient of friction is strongly correlated with the sensations of softness and pleasant touch. On the one hand, it was found a strongly positive correlation between coefficient of friction and tensile strength. On the other hand, it was found a strongly negative correlation between coefficient of friction and tensile stiffness, thickness and grammage.

Keywords tactile perception, mechanical properties, coefficient of friction, biotribology, paper, human skin.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Simbologia e Siglas	xvii
Simbologia.....	xvii
Siglas	xviii
1. INTRODUÇÃO TEÓRICA	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objectivos	2
1.3. Estrutura da Dissertação	2
1.4. Revisão de Literatura	3
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
2.1. Materiais	17
2.2. Métodos	20
2.2.1. Ensaios de Tracção	20
2.2.1.1. Resistência à Tracção e Deformação à Rotura.....	22
2.2.1.2. Rigidez à Tracção.....	23
2.2.1.3. Absorção de Energia à Tracção.....	25
2.2.2. Testes de Atrito.....	27
2.2.2.1. Condições dos Ensaios	27
2.2.2.2. Equipamentos e sua Calibração.....	28
2.2.2.3. Coeficiente de Atrito Dinâmico	31
2.2.2.4. Humidade Relativa do Papel	32
2.2.3. Questionário para Determinar a Percepção Táctil.....	33
2.2.4. Outros	36
2.2.4.1. Gramagem e Espessura	36
2.2.4.2. Correlação entre Propriedades	38
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
3.1. Factores que Influenciam o Coeficiente de Atrito	39
3.2. Comparação entre Propriedades Mecânicas e o Coeficiente de Atrito.....	43
3.3. Propriedades Tácteis e Influência do Coeficiente de Atrito	46
4. CONCLUSÕES	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
ANEXO A	59
ANEXO B	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Fluxograma genérico do processo de fabrico do papel [4].	5
Figura 1.2. Estrutura da pele humana (http://www.afh.bio.br/sentidos/img/sentidos%20pele.jpg).	6
Figura 1.3. Organograma com os principais factores que influenciam o coeficiente de atrito entre o papel e a pele humana.	9
Figura 2.1. Diferentes amostras utilizadas no âmbito deste trabalho. a) Papel de impressão; b) Papel de bar; c) Toalha de papel; d) Guardanapo de papel; e) Papel higiénico; f) Rolo de papel de cozinha; g) Lenço de papel.	18
Figura 2.2. Amostra de papel inserida na máquina de tracção depois do ensaio ter terminado. Para este exemplo, a amostra visível na figura é de um guardanapo de papel.	21
Figura 2.3. Exemplo de uma curva de evolução da tensão de tracção em função da deformação.	23
Figura 2.4. Exemplo de uma secção de uma curva de evolução da força de tracção em função do deslocamento, com a linha de tendência linear. Esta secção encontra-se em regime elástico.	25
Figura 2.5. Exemplo de uma curva de evolução da força de tracção em função do deslocamento.	26
Figura 2.6. Regiões anatómicas em estudo e respectivas ampliações. À esquerda está representada a face ventral do antebraço e à direita está representada a palma da mão [38].	27
Figura 2.7. Sonda de medição portátil: (a) imagem da sonda com uma amostra de papel fixa a uma ponta de prova através de um O-ring; (b) imagem esquemática do sensor de força de dois eixos (adaptação de [30]).	29
Figura 2.8. Rectas de calibração da célula de carga. Em abcissas está representada a tensão medida à saída do amplificador e em ordenadas está representada a força aplicada na célula de carga. (a) – Direcção normal; (b) – Direcção tangencial.	30
Figura 2.9. Exemplo de uma curva de evolução da força tangencial em função da força normal, com a linha de tendência linear.	32
Figura 2.10. Exemplo de amostras em ambiente controlado de humidade relativa via solução salina saturada.	33
Figura 2.11. Representação da realização dos questionários de percepção táctil.	36
Figura 2.12. Imagem ilustrativa da medição da espessura das amostras.	37
Figura 3.1. Coeficientes de atrito medidos no antebraço e na palma da mão a uma humidade relativa de 55%. a) Papel de impressão; b) Papel de bar; c) Toalha de	

papel; d) Guardanapo de papel; e) Papel higiénico; f) Rolo de papel de cozinha; g) Lenço de papel.	40
Figura 3.2. Coeficientes de atrito medidos na palma da mão (a) e no antebraço (b) a 3 humidades relativas diferentes. a) Papel de impressão; b) Papel de bar; c) Toalha de papel; d) Guardanapo de papel; e) Papel higiénico; f) Rolo de papel de cozinha; g) Lenço de papel.	41
Figura 3.3. Comparação do coeficiente de atrito com a espessura (a) e com a gramagem (b). A figura mostra uma linha de tendência em cada um dos casos (a) e (b) e o respectivo coeficiente de determinação.	43
Figura 3.4. Comparação do coeficiente de atrito com a resistência à tracção. A figura mostra uma linha de tendência e respectivo coeficiente de determinação.	44
Figura 3.5. Comparação do coeficiente de atrito com a rigidez à tracção. A figura mostra uma linha de tendência e respectivo coeficiente de determinação.	45
Figura 3.6. Comparação do coeficiente de atrito com a absorção de energia por tracção. A figura mostra uma linha de tendência e respectivo coeficiente de determinação.	45
Figura 3.7. Resultados dos testes de percepção táctil. Para perceber a escala utilizada ver subcapítulo 2.2.3. a) Papel de impressão; b) Papel de bar; c) Toalha de papel; d) Guardanapo de papel; e) Papel higiénico; f) Rolo de papel de cozinha; g) Lenço de papel.	46
Figura 3.8. Resultados dos testes de percepção táctil relativamente às qualidades suave-áspero e agradável-desagradável, comparativamente aos testes de atrito. Para perceber a escala utilizada ver subcapítulo 2.2.3. a) Papel de impressão; b) Papel de bar; c) Toalha de papel; d) Guardanapo de papel; e) Papel higiénico; f) Rolo de papel de cozinha; g) Lenço de papel.	47
Figura 3.9. Comparação do coeficiente de atrito com: (a) a suavidade; (b) a agradabilidade ao toque. Ambas as figuras mostram uma linha de tendência e respectivo coeficiente de determinação.	48
Figura 3.10. Resultados dos testes de percepção táctil separados por género, relativamente à qualidade suave-áspero. Para perceber a escala utilizada ver subcapítulo 2.2.3. a) Papel de impressão; b) Papel de bar; c) Toalha de papel; d) Guardanapo de papel; e) Papel higiénico; f) Rolo de papel de cozinha; g) Lenço de papel.	49
Figura A.1. Influência da velocidade de ensaio na resistência à tracção. b) Papel de bar; c) Toalha de papel; d) Guardanapo de papel; e) Papel higiénico; f) Rolo de papel de cozinha; g) Lenço de papel.	59
Figura A.2. Influência da velocidade de ensaio na deformação à rotura. a) Papel de impressão; b) Papel de bar; c) Toalha de papel; d) Guardanapo de papel; e) Papel higiénico; f) Rolo de papel de cozinha; g) Lenço de papel.	60
Figura A.3. Influência da velocidade de ensaio na absorção de energia à tracção. b) Papel de bar; c) Toalha de papel; d) Guardanapo de papel; e) Papel higiénico; f) Rolo de papel de cozinha; g) Lenço de papel.	60

Figura A.4. Influência da velocidade de ensaio na rigidez à tracção. b) Papel de bar; c) Toalha de papel; d) Guardanapo de papel; e) Papel higiénico; f) Rolo de papel de cozinha; g) Lenço de papel..... 61

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Características de cada voluntário e condições ambiente durante os testes. Na coluna do género: F – sexo feminino; M – sexo masculino.....	34
Tabela 2.2. Papéis de referência utilizados de acordo com as características de percepção táctil.....	35
Tabela 2.3. Valores de espessura, gramagem e massa volúmica para os vários tipos de papel.....	38

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

Δc – Deslocamento da amostra

$(\Delta c)_i$ – Corresponde aos valores dos pontos (de índice i) de deslocamento, pertencentes ao intervalo entre a e b

ε – Deformação à rotura

μ – Coeficiente de atrito dinâmico

ρ – Coeficiente de Spearman

ρ_A – Gramagem

σ – Tensão de tracção

a – Deslocamento inicial

A – Área da amostra

A_{fd} – Área abaixo da curva de força, F , em função do deslocamento, c

b – Deslocamento final

b_1 – Intercepção da recta com o eixo vertical

c – Comprimento (entre amarras) inicial da amostra

d – Somatório das diferenças dos valores ordinais associados aos parâmetros analisados

E_T – Absorção de energia à tracção

F – Força de tracção

F_c – Factor de calibração

F_n – Força normal

F_t – Força tangencial

k – Rigidez à tracção

l – Largura (inicial) da amostra

m – Declive da recta

M – Massa da amostra

n_1 – Número de pontos utilizados para a análise da regressão linear

n_2 – Número total de pares de dados utilizados na análise estatística

T – Tensão eléctrica

x – Corresponde ao deslocamento da amostra, Δc

y – Corresponde ao valor da força de tracção, F

Siglas

ASTM – American Society for Testing and Materials

DM – Direcção da Máquina

HR – Humidade Relativa

PIB – Produto Interno Bruto

PVC – Policloreto de Vinila

XPS – Espectroscopia Fotoeléctrica de Raio-X (*X-ray photoelectron spectroscopy*)

1. INTRODUÇÃO TEÓRICA

Na presente dissertação irão ser investigadas propriedades físicas (mecânicas e tribológicas) e tácteis de diferentes tipos de papel para uso pessoal, em particular para higiene pessoal.

A tribologia é o ramo da física que se dedica ao estudo dos fenómenos de atrito, desgaste e lubrificação, no entanto, neste estudo apenas o atrito irá ser alvo de uma análise. Uma vez que os diferentes tipos de papel têm como fim o contacto com a pele, o atrito irá ser medido entre cada tipo de papel e diferentes regiões do corpo humano. No que diz respeito às propriedades mecânicas, estas irão ser obtidas através da realização de ensaios de tracção. As propriedades tácteis irão ser analisadas através de testes de percepção táctil.

1.1. Motivação

No que concerne ao interesse do tema em estudo existem alguns aspectos fundamentais a ter em consideração. Com o passar dos anos é possível observar que o papel tem tido um aumento crescente no seu consumo e nas suas aplicações. Por exemplo, nos papéis para uso pessoal, este aumento deve-se essencialmente à melhoria das condições de vida nos países subdesenvolvidos. Tendo em conta que os primeiros registos da utilização de papel datam acerca de 2 mil anos atrás, e que o seu consumo, de um modo geral, tem vindo a aumentar ao longo do tempo, não se prevê que este venha a ser substituído nas próximas décadas ou até mesmo séculos. Além do mais, o papel quando comparado com outros materiais com a mesma finalidade, apresenta propriedades mecânicas e tribológicas bastante boas a um custo reduzido. Na verdade, quando se pensa em alternativas à utilização de papel não existem grandes opções. Por exemplo, o papel de impressão já se utiliza há dezenas de anos e ainda não foi substituído por outro material até ao momento.

Tal como qualquer bem produzido, o papel está constantemente num processo de melhoria contínua. O interesse desta indústria em melhorar a agradabilidade ao toque é bastante elevado, quer devido à própria concorrência que existe neste sector, quer devido à

exigência crescente do consumidor final. Na medida em que as amostras em estudo actuam em zonas bastante sensíveis do corpo humano, esta investigação toma uma maior relevância na medida em que uma pequena variação de um parâmetro físico pode alterar a sensação de percepção táctil por parte do utilizador. Além da sensação agradável ou desagradável, a utilização prolongada do papel em contacto com a pele também pode levar a lesões causadas pelo atrito. Posto isto, acresce que o sector da pasta e do papel representam cerca de 3% das exportações e 1% do PIB nacional, daí a sua elevada importância a nível económico. Além disso, os estudos realizados no seio da comunidade científica ainda são bastante reduzidos e, portanto, ainda existe bastante por explorar sobre o tema.

1.2. Objectivos

O presente estudo tem como principal objectivo tentar perceber como se podem variar as propriedades mecânicas e tribológicas do papel, de modo a que este tenha uma sensação mais agradável ao toque. A propriedade física a que se irá dar mais foco será o atrito, sendo que, também irão ser analisados parâmetros que o possam alterar.

Assim sendo, é pretendido com este trabalho o seguinte:

- Analisar as diferenças que possam existir entre os ensaios de atrito na palma da mão e no antebraço.
- Verificar o comportamento do coeficiente de atrito com a alteração da humidade relativa do papel.
- Correlacionar o coeficiente de atrito com algumas propriedades mecânicas.
- Correlacionar o coeficiente de atrito com as propriedades tácteis.
- Comparar as propriedades tácteis de acordo com o género.

1.3. Estrutura da Dissertação

De forma a entender melhor a estrutura da presente dissertação e de como estão articulados os vários capítulos, será apresentado muito resumidamente o que se pretende com cada capítulo.

Esta dissertação é constituída por 4 capítulos. No capítulo 1, Introdução Teórica, é apresentada a motivação do tema, assim como, os objectivos que se pretendem atingir com este trabalho. Também é feita uma revisão de literatura onde são descritos alguns conhecimentos teóricos e trabalhos realizados previamente a este estudo.

No capítulo 2, são apresentados os vários tipos de papel que irão ser estudados, bem como todos os métodos, teóricos e experimentais, necessários para a análise e discussão dos resultados, respectivamente.

No capítulo 3, Resultados e Discussão, são apresentados os resultados mais importantes que se obtiveram no âmbito deste estudo. Estes resultados são comparados com estudos prévios, no caso de já existirem, e discutidos de forma a perceber se realmente fazem sentido.

Por ultimo, no capítulo 4, são apresentadas as principais conclusões que se puderam retirar com este trabalho. Além disso, são sugeridas propostas de trabalho futuro acerca do tema em estudo.

1.4. Revisão de Literatura

Com o passar dos anos, o papel tem vindo a ser cada vez mais importante para a sociedade como referido anteriormente. Este é um material de origem vegetal. Actualmente é obtido através do processamento de fibras de celulose, provenientes maioritariamente de alguns tipos de madeira branca. Geralmente é comercializado sob a forma de folhas ou rolos.

De facto, o papel é utilizado em diversas áreas e frequentemente é considerado um bem descartável. Contrariamente aos tecidos, o papel não tem estrutura interna e é composto por fibras de celulose separadas. Como exemplo de algumas aplicações da sua utilização temos todo o tipo de papel que é utilizado para higiene pessoal, o papel para embalar produtos, os sacos de papel, os lençóis que normalmente são utilizados nos hospitais, o papel de impressão, os livros, revistas e jornais, o papel de parede, o papel utilizado na indústria gráfica, entre outros.

O que distingue o papel da cartolina e do cartão é a gramagem (massa por unidade de área), ou seja, o papel propriamente dito tem uma gramagem em geral inferior a 150 g/m^2 . No caso da cartolina, a gramagem varia entre 150 a 400 g/m^2 e para o cartão esta é superior a 400 g/m^2 [1]. Thieulin *et al.* (2017) [2] mediram a gramagem de dez

diferentes tipos de papel higiênico e obtiveram valores compreendidos entre os 48,6 e os 87,5 g/m^2 com a espessura média a variar de 0,40 a 0,77 mm . Também foram medidos valores de gramagem para oito diferentes tipos de papel de impressão [3]. Foram obtidos valores compreendidos entre os 45 e os 130 g/m^2 .

Relativamente às propriedades mecânicas do papel higiênico, foram encontrados valores de resistência à tracção no intervalo de 127 a 567 N/m e a deformação à rotura variou entre 8,8 e 23 % [2].

De facto, existem vários tipos de papel com propriedades bastante distintas entre si. Dependendo da aplicação existem factores aos quais é dada uma maior importância de modo a que o papel desempenhe a função exigida. Estes factores, nomeadamente as propriedades mecânicas e tribológicas e as sensações de percepção táctil, variam de acordo com inúmeros parâmetros, nomeadamente com todo o processo de obtenção da pasta de papel e de fabricação do papel.

Dependendo do processo de obtenção da pasta de papel, este denomina-se por mecânico, químico ou semiquímico. Este último corresponde a uma mistura de papéis obtidos por meios mecânicos e químicos em proporções variáveis. Tipicamente, hoje em dia a pasta de papel mais produzida é a pasta de papel obtida por meios semiquímicos. O papel obtido através de pasta mecânica, apesar de ser o mais económico é o que apresenta piores propriedades. O papel obtido através da pasta de celulose por meios químicos tem uma elevada qualidade devido ao tratamento da madeira com determinados produtos químicos, no entanto, torna-se bastante dispendioso. Além de madeira, também é utilizado papel reciclado na produção da pasta.

A fabricação do papel propriamente dita inicia-se com a adição de um ligante, uma carga e por vezes um agente corante adicionado à pasta de celulose. Na Figura 1.1. **Fluxograma genérico do processo de fabrico do papel** é apresentado um fluxograma genérico do processo de fabrico do papel. Neste fluxograma indicam-se as matérias-primas utilizadas e os resíduos gerados em cada fase da produção.

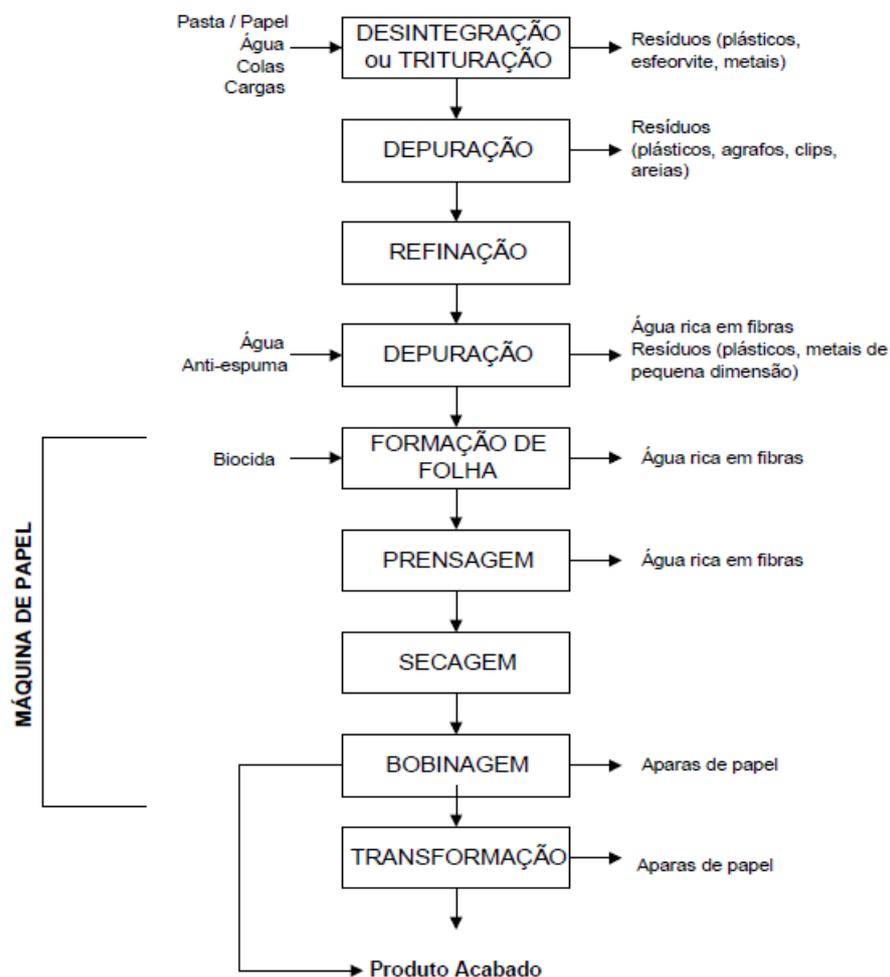


Figura 1.1. Fluxograma genérico do processo de fabrico do papel [4].

Relativamente às várias etapas do processo de fabrico do papel, foram feitas investigações acerca da refinação, formação de folha, secagem e calandragem (ou prensagem) onde foi estudada a influencia destes processos no coeficiente de atrito medido. Segundo Broughton & Gregg (1952) [5] a refinação não afecta significativamente o atrito. Resultados diferentes foram obtidos relativamente ao efeito da calandragem no atrito. Enquanto que Broughton & Gregg (1952) [5] observaram uma redução do atrito com a calandragem, Jones & Peel (1967) [6] observaram o oposto. Também os extractivos da madeira (compostos dos produtos químicos utilizados no decorrer da produção) e a contaminação superficial do papel foram alvos de um estudo. Foi verificado que estes factores influenciam o coeficiente de atrito sendo que estes efeitos são atribuídos à forma como modificam a energia de superfície livre do papel [5], [7].

Segundo o Dicionário da Língua Portuguesa (2009) [8], o atrito define-se como sendo uma “força que se opõe ao movimento de uma superfície relativamente a outra com a qual está em contacto”. Como já foi referido, todos os papéis que irão ser estudados têm como finalidade o contacto com a pele. Assim sendo, faz todo o sentido que o coeficiente de atrito seja medido entre o papel e uma zona do corpo humano. Além das características do próprio papel, o coeficiente de atrito também depende de outros factores como as propriedades da pele e condições externas aos materiais em contacto.

A pele é o maior órgão do nosso corpo, cobrindo em média cerca de $1,8 m^2$ de área superficial em pessoas adultas [9]. Tem uma estrutura que actua como fronteira e primeira linha de defesa contra a invasão de agentes externos e é, além disso, um órgão sensorial, um agente de secreção e excreção e um regulador de temperatura corporal. A sua estrutura pode ser visualizada em mais detalhe na Figura 1.2.

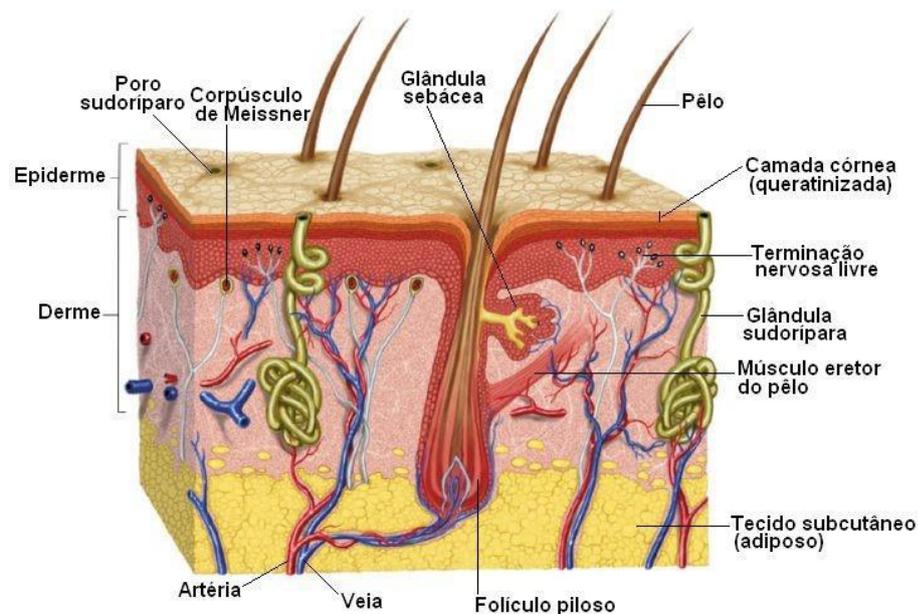


Figura 1.2. Estrutura da pele humana (<http://www.afh.bio.br/sentidos/img/sentidos%20pele.jpg>).

Considera-se a pele como sendo um material compósito de multicamadas (epiderme, derme e tecido subcutâneo) [10], em que dentro das diferentes camadas encontram-se foliculos pilosos, glândulas sudoríparas e sebáceas, vasos sanguíneos, bem como receptores sensoriais. A sua superfície é protegida por um filme lipídico que é composto de água (suor) e sebo (produzido e excretado pelas glândulas sebáceas) que cobrem o estrato córneo e influenciam as propriedades de adesão da pele. A sua espessura

varia de acordo com a região anatómica. Considerando apenas a derme e a epiderme, a pele é mais espessa nas palmas das mãos e nas plantas dos pés, e mais fina nas zonas de flexibilidade dos membros e na face. Isto deve-se essencialmente ao tecido subcutâneo (adiposo) onde este em geral é mais abundante em zonas como por exemplo o abdómen e os glúteos e menos abundante em zonas como a face dorsal da mão. Em média este é mais espesso em pessoas do sexo feminino comparativamente ao sexo masculino [11]. Também a epiderme varia de espessura podendo ter até 2 mm. Em zonas onde normalmente existe um maior contacto com superfícies, nomeadamente as palmas das mãos e dos pés, a epiderme apresenta uma espessura superior [12].

Relativamente ao módulo de elasticidade, foram encontrados valores da pele *in vivo* bastante dispersos, a variarem em cerca de 4 ordens de grandeza (4,4 kPa até 57 MPa) [13]. Verifica-se que a pele apresenta propriedades físicas bastante diferentes dependendo das condições em que se encontra.

O tacto é o sentido que nos permite reconhecer a forma e características de um objecto, contribuindo também para a percepção das condições ambientais envolventes. Isto só é possível pois encontram-se na pele, mais especificamente na derme, receptores tácteis das terminações nervosas que se denominam de corpúsculos de Pacini, Ruffini, Meissner e Krause. Assim, podemos receber vários estímulos fisiológicos como a dor, a temperatura, a pressão, a vibração, entre outras percepções tácteis [14]. Ao tocarmos na superfície de um objecto, os vários *mecanoreceptores* são activados através dos diferentes estímulos. O contacto entre a pele e a superfície do objecto origina um sinal mecânico que é transformado num sinal eléctrico através dos *mecanoreceptores*. Ao ser analisado pelo cérebro, este sinal é traduzido numa sensação de percepção táctil [2]. A capacidade táctil varia de acordo com a região anatómica em questão, sendo que as zonas onde esta capacidade está mais desenvolvida são as mãos, especificamente a ponta dos dedos. Isto deve-se aos *mecanoreceptores* não estarem uniformemente distribuídos sobre toda a superfície corporal [15]. De acordo com Barnes *et al.* (2004) [16], sentimentos positivos ou agradáveis ocorrem quando um dedo desliza sobre uma superfície com uma rugosidade inferior à rugosidade do próprio dedo. Por outro lado, sentimentos negativos ocorrem quando um dedo desliza sobre uma superfície com uma rugosidade superior à do próprio dedo.

O conhecimento do comportamento tribológico da pele humana em contacto com outros materiais é de elevada importância na medida em que permite otimizar superfícies de materiais em contacto com a pele. Apesar da pele apresentar uma estrutura complexa, de facto, quando esta é analisada relativamente ao seu comportamento tribológico, é feita uma simplificação. Considera-se que a superfície da pele está em contacto com a superfície de um material, na presença de um possível “lubrificante” e com umas determinadas condições externas [17]. Para efeitos de simplificação considera-se que a pele é um material homogéneo. Esta simplificação permite que não seja requerido conhecer a estrutura dos materiais ao detalhe para obter alguma optimização do seu comportamento ao atrito. Através deste tipo de abordagem paramétrica vão-se alterando algumas variáveis para verificar o seu comportamento e adquirir conhecimentos na área da biotribologia.

De acordo com Johnson *et al.* (1993) [18], a pele é caracterizada como sendo um material de comportamento viscoelástico não-linear. Assim sendo, a lei de Amontons-Coulomb, que afirma que a força de atrito é directamente proporcional à força normal e independente da área de contacto, não é válida. Portanto, serão aplicados os conceitos teóricos do atrito de elastómeros para descrever o comportamento tribológico da pele humana [19]. Estes conceitos implicam um modelo de atrito de duas fases, a adesão (força total necessária para quebrar as ligações adesivas entre as duas superfícies em contacto) e a deformação (força relacionada com a deformação dos corpos em contacto). Segundo Adams *et al.* (2007) [20], a adesão é considerada como o principal contributo do atrito na pele humana, ao invés dos mecanismos de deformação que são menos relevantes. Em 2009, Mattei *et al.* [21] demonstrou que a camada lipídica presente na superfície da pele seria a responsável pelo efeito de adesão.

Existem algumas publicações sobre estudos de atrito realizados entre a pele humana e diferentes tipos de materiais. Derler & Gerhardt (2012) [13] e Van Der Heide *et al.* (2013) [17] realizaram uma revisão de literatura e reuniram vários resultados dos coeficientes de atrito dinâmico para os diferentes materiais testados contra a superfície da pele. Foram analisados polímeros, metais, vidro, tecidos, papel, entre outros. Os valores dos coeficientes de atrito apresentados variam entre 0,09 e 2,7. Relativamente às condições de ensaio, a força normal máxima exercida foi de sensivelmente 4 N para o antebraço e 25 N para o dedo indicador. As zonas anatómicas mais estudadas foram a face ventral do

antebraço e o dedo indicador. A palma da mão também já foi alvo de estudo, embora não tivesse sido alvo tanta investigação como a face ventral do antebraço e o dedo indicador. Através de uma primeira análise aos resultados apresentados, verifica-se que existe um obstáculo ao nível das comparações entre os resultados obtidos. Uma vez que cada estudo foi executado em condições experimentais diferentes, torna-se difícil e ambíguo comparar o coeficiente de atrito entre dois ou mais materiais. No entanto, para os ensaios realizados em condições semelhantes ou dentro do mesmo estudo, pode-se ter uma ideia acerca de quais os materiais com um maior valor de atrito e vice-versa. Pelo facto de a biotribologia ser uma área relativamente recente, e ainda não existirem muitos estudos acerca deste tema, a utilização de normas é praticamente inexistente.

Na Figura 1.3, são apresentados através de um organograma, os principais factores que influenciam o coeficiente de atrito do papel sobre a pele.



Figura 1.3. Organograma com os principais factores que influenciam o coeficiente de atrito entre o papel e a pele humana.

Este organograma enumera três factores primários que influenciam o atrito, sendo eles as características do papel, as condições da pele e os factores externos aos materiais em contacto. Abaixo deste nível hierárquico estão os factores que influenciam os factores primários.

Do conhecimento do autor, existem alguns estudos acerca das propriedades físicas do papel, sendo que em alguns desses estudos são também realizados testes de percepção táctil [2], [3], [22], [23].

Muito recentemente, Thieulin *et al.* (2017) [2] fizeram um estudo acerca da percepção táctil em 10 tipos diferentes de papel higiénico. Para isso, foi feita uma avaliação sensorial com 30 participantes (13 pessoas do sexo feminino e 17 do sexo masculino) com idades compreendidas entre os 25 e os 55 anos. A estes voluntários foi pedido que avaliassem, com os olhos vendados, as propriedades tácteis baseadas em dois critérios descritivos: a suavidade e a textura superficial. Para a textura superficial, os voluntários tiveram de classificar as amostras em duas categorias: papéis macios ou papéis suaves. Após a realização dos testes de percepção táctil, cada voluntário realizou testes de atrito utilizando o dedo indicador. Foram obtidos coeficientes de atrito para os papéis considerados macios entre 1,54 e 1,68, enquanto que, para os papéis considerados suaves foram obtidos valores de atrito entre 1,17 e 1,34. A maior fricção produzida pelos papéis macios quando comparada com os papéis suaves foi atribuída às fibras livres à superfície do papel, que aumentaram a adesão entre o papel e o dedo. Através da análise e comparação de resultados, Thieulin *et al.* (2017) [2] verificaram que existe uma ligeira tendência da suavidade ser melhorada com o aumento da espessura do papel, e também, com a diminuição do valor da resistência à tracção. De salientar que Thieulin *et al.* (2017) [2] desenvolveram um dedo artificial para a realização dos testes tribológicos com propriedades semelhantes às do dedo humano. A utilização deste objecto, a uma larga escala, teria a grande vantagem dos resultados dos testes deixarem de depender das propriedades do dedo do indivíduo que os realiza. Assim, as investigações tornar-se-iam mais semelhantes entre si, facilitando a comparação dos resultados dos testes de atrito.

Analogamente ao estudo anterior, também Skedung *et al.* (2011) [3] investigaram a percepção táctil, analisando 8 diferentes tipos de papel de impressão. Além disso, também foi analisada a relação entre a percepção táctil de rugosidade com os coeficientes de atrito medidos. Relativamente aos testes de percepção táctil, estes foram

realizados através de 25 estudantes universitários entre os 22 e os 29 anos (10 do sexo feminino e 15 do sexo masculino). Cada voluntário fez a sua avaliação de olhos vendados e utilizou a sua própria escala natural. Posteriormente todas as escalas foram normalizadas de forma a serem comparáveis. Os voluntários também realizaram testes de atrito sendo que os coeficientes de atrito médios obtidos variaram entre 0,35 e 0,60. Uma correlação negativa foi obtida entre a percepção táctil da rugosidade com os coeficientes de atrito medidos.

Em 2005, Gee *et al.* [22] realizaram um estudo de atrito em diversos materiais, sendo que um dos materiais era o papel, nomeadamente o papel de impressão. Além disso, no âmbito desse trabalho de investigação, o papel era o único material hidrofílico, ou seja, com acção absorvente. O coeficiente de atrito medido para o papel foi de sensivelmente 0,60. No entanto, o mais curioso é que o coeficiente de atrito decresceu sucessivamente após cada ensaio, iniciando em 1,20 e terminando em 0,50. Segundo Gee *et al.* [22], esta diminuição sequencial deveu-se ao facto de o papel ir absorvendo constantemente humidade da pele durante cada ensaio, levando a uma alteração das suas propriedades tribológicas, e resultando numa redução do coeficiente de atrito. Também Skedung *et al.* (2010) [23] demonstraram que, de facto, o atrito de um dedo deslizando sobre uma amostra de papel de impressão apresentava uma tendência decrescente, essencialmente nas primeiras medições. Através de medições utilizando a tecnologia de XPS foi demonstrado que esta tendência se deveu ao material lipídico da pele ser transferido do dedo para a superfície do papel ao longo de cada ensaio. Para se ter uma noção sobre onde o papel se encontra relativamente às suas propriedades tribológicas, os restantes materiais testados (policarbonato, aço, polietileno, borracha e vidro) apresentaram um coeficiente de atrito compreendido entre 1,3 e 2,7. Sendo assim, o papel foi o material que apresentou o coeficiente de atrito inferior. Posto isto, verifica-se que os materiais hidrofílicos apresentam em geral um coeficiente de atrito inferior aos materiais hidrofóbicos. Esta conclusão foi também feita mais tarde por Tomlinson *et al.* (2011) [24]. Gurnagul *et al.* (1992) [7] concluíram que para amostras de papel com rugosidades superficiais semelhantes o coeficiente de atrito é controlado pelo grau de hidrofobia da superfície do papel.

Apesar de Gee *et al.* (2005) [22] e de Skedung *et al.* (2011) [3] terem ambos realizado testes de atrito a papel de impressão, obtiveram valores diferentes para o

coeficiente de atrito. É necessário ter em conta que os papéis possivelmente não eram exactamente iguais, no entanto a diferença de resultados deve-se essencialmente às diferentes condições experimentais e procedimentos. Aparentemente, o principal factor que pode ter influenciado de uma forma mais acentuada os resultados terá sido a carga normal aplicada. Enquanto que no estudo de Gee *et al.* (2005) [22] a carga normal variou de 2 a 20 N, no estudo de Skedung *et al.* (2011) [3] foi utilizada uma carga compreendida entre 0,2 e 5,2 N. Em ambas as investigações o atrito foi medido com a ponta do dedo. As cargas aplicadas nestes estudos poderão não ter sido escolhidas da melhor forma, pois, de acordo com Ramalho *et al.* (2006) [25], para cargas mais elevadas o atrito na ponta dos dedos apresenta um comportamento caracterizado por dois regimes. Acresce que, de acordo com Skedung *et al.* (2011) [3], essa transição entre regimes (na ponta do dedo) ocorre a sensivelmente 2 N. Um comportamento semelhante também já foi verificado na zona da face ventral do antebraço, enquanto que nas palmas das mãos o atrito apresenta apenas um regime [26]. Estas diferenças de comportamento poderão estar relacionadas com a espessura da pele.

Mais recentemente em 2016, Vilhena & Ramalho [10] investigaram o atrito da pele humana sobre diferentes tecidos para uso médico. Os resultados demonstraram que o coeficiente de atrito de um tecido hospitalar de referência sobre a pele é influenciado pela região do corpo humano e pelas condições de lubrificação e fisiologia da pele, como por exemplo o teor de humidade. Para as diferentes regiões anatómicas, o coeficiente de atrito na pele molhada excedeu o coeficiente de atrito nas condições naturais da pele por um factor superior a dois, com o atrito a aumentar com o aumento do teor de humidade. Também a utilização de Vaselina fez com que o coeficiente de atrito aumentasse, quando comparado com as condições naturais da pele.

Comparando os resultados obtidos por Gee *et al.* (2005) [22] com os de Vilhena & Ramalho (2016) [10], é possível retirar conclusões bastante interessantes. Aparentemente, enquanto que o aumento do teor de humidade no papel leva a uma diminuição do coeficiente de atrito, o aumento do teor de humidade na pele leva a um aumento do coeficiente de atrito. Além disso, Ramalho *et al.* (2009) [27] estudaram a influencia da humidade ambiente nos testes de atrito utilizando para isso tecidos têxteis. Verificaram que aumentando a humidade relativa ambiente de 30 para 50%, o coeficiente de atrito diminuía. Estes resultados poderão querer dizer que a humidade presente num

material tem mais influência que a humidade presente na pele, pois, tanto o papel como a pele absorvem a humidade relativa ambiente. No entanto, esta observação é apenas uma especulação. Também a temperatura influencia os resultados de atrito [28]. Relativamente ao coeficiente de atrito estático, o aumento de temperatura leva a um aumento do coeficiente de atrito.

Em 2009, Chen *et al.* [29] realizaram um estudo onde compararam as propriedades tácteis com as propriedades físicas superficiais de embalagens para confeitaria. Para isso, avaliaram as propriedades tácteis de 37 embalagens diferentes através de 18 participantes, que tocaram nos vários materiais estando impossibilitados de os observar. A avaliação foi feita de acordo com uma escala de 1 a 5 para as seguintes características: quente-frio, escorregadio-adesivo, macio-áspero, duro-suave, irregular-plano e molhado-seco. Também a rugosidade superficial, a conformabilidade, o atrito e a taxa de arrefecimento foram medidos. Através de uma análise de correlação foi possível demonstrar que a percepção táctil está frequentemente associada a mais de uma propriedade física. Por exemplo, a avaliação da característica quente-frio depende da conformabilidade e da taxa de arrefecimento, enquanto que, a característica molhado-seco depende do coeficiente de atrito, da conformabilidade e da rugosidade superficial. Também foi demonstrado que as propriedades tácteis estariam relacionadas entre si. Por exemplo, as percepções de temperatura estariam relacionadas com as percepções de suavidade, enquanto que, as percepções de humidade estariam relacionadas com as percepções de rugosidade, planicidade e aderência.

Em 2013, Ramalho *et al.* [30] fizeram um estudo comparativo entre a percepção táctil e o atrito avaliado directamente em testes *in vivo* para diferentes têxteis. Participaram nos testes 19 voluntários (7 pessoas do sexo feminino e 12 do sexo masculino) entre os 21 e os 57 anos. Classificaram os diferentes têxteis numa escala de 1 a 5 para diferentes características: suave-áspero, macio-duro, escorregadio-aderente, quente-frio e agradável-desagradável. Os voluntários realizaram os testes sem o impedimento de visualizar os materiais que estavam a avaliar. As duas regiões anatómicas investigadas foram a palma da mão e a face ventral do antebraço sendo que o atrito foi superior na zona da palma da mão. Através da análise dos resultados foi possível concluir que relativamente aos testes de atrito as pessoas do sexo masculino apresentaram sempre valores superiores de coeficiente de atrito comparativamente ao sexo feminino em ambas as regiões do corpo

investigadas. Verificou-se um efeito de género, mais acentuado na palma da mão do que na face ventral do antebraço. Pela comparação de respostas a um questionário sobre percepção táctil com os resultados das medições de atrito, uma correlação positiva foi obtida especialmente relativamente à suavidade e aderência.

Ramalho *et al.* (2007) [26] estudaram a influência de hidratantes em diferentes regiões do corpo, nomeadamente a palma da mão e a face ventral do antebraço, através de testes de atrito *in vivo*. Ambas as regiões do corpo foram deslizadas sobre uma superfície de vidro. Os resultados obtidos demonstram que o comportamento do atrito depende da região anatómica. Isto deve-se ao facto de existirem zonas do corpo com diferentes níveis de hidratação. A palma da mão apresentou apenas um regime, com um coeficiente de atrito constante ao longo da variação da evolução da carga normal, enquanto que o antebraço apresentou um atrito caracterizado por dois regimes, como mencionado anteriormente. Além disso, a utilização de hidratantes fez como que o coeficiente de atrito diminuísse nos primeiros cinco minutos após a sua aplicação, quando comparado com as condições naturais da pele. Após esse tempo os hidratantes influenciaram o coeficiente de atrito de forma contrária, aumentando. Posto isto, o tempo é o principal factor que influencia a hidratação da pele e consequentemente o atrito. El Shimi (1977) [31] demonstrou que quanto mais seca for a pele, menor será o coeficiente de atrito.

Quanto à influencia nas propriedades tribológicas da pele, a etnia, o género e a idade já foram investigados. Relativamente ao género, foi verificado um forte efeito deste na zona da palma das mãos. As pessoas do sexo feminino exibiram um coeficiente de atrito de até 50% inferior ao sexo masculino. Na zona da face ventral do antebraço esta redução foi de apenas cerca de 5%, de acordo com Ramalho *et al.* (2013) [30]. No que diz respeito à etnia e à idade, não foram encontradas diferenças significativas no atrito da pele [32], [33].

Existem vários factores que podem influenciar o coeficiente de atrito derivados do procedimento experimental e dos instrumentos utilizados durante a realização dos ensaios. Normalmente, estes tipos de ensaio são sempre realizados na direcção da máquina (DM), ou seja, a direcção do papel correspondente à direcção de movimento da máquina onde este foi produzido. No entanto, segundo Fellers *et al.* (1998) [34] e Gurnagul *et al.* (1992) [7], a direcção em que os ensaios são realizados não influencia as medições de atrito. Tipicamente, existem dois tipos de ensaios mais frequentes. Normalmente, ou é

deslizado o dedo indicador sobre a superfície do material em estudo fixo a um tribómetro, ou então, com o material em estudo fixo a uma ponta de prova, esta é deslizada sobre a superfície da pele (apoiada em algum local) [2], [3], [10], [22], [23], [25], [28]. Geralmente, estes tipos de instrumentos são compostos por um sensor de força de dois eixos. Em alguns casos são constituídos por um sensor de força de três eixos, que serve para evitar erros associados a pequenas diferenças na direcção dos movimentos de deslize da pele ou do material em contacto com a pele. Também a velocidade de deslizamento ou de rotação e a força normal aplicada foram alvo de uma análise. Relativamente à velocidade de deslizamento, Tang *et al.* (2008) [35] reportaram um aumento do coeficiente de atrito de 0,39 para 0,52 com a velocidade a aumentar também de 0,5 até 4 mm/s. Da mesma forma Zhang & Mak (1999) [36] observaram um ligeiro aumento do atrito com o aumento da velocidade rotacional. Relativamente à variação da força normal aplicada, Tang *et al.* (2008) [35] verificaram que ao aumentar esta força, estariam também a aumentar o coeficiente de atrito.

A área de contacto real entre duas superfícies, é o parâmetro principal que faz com que seja simples e lógico entender o porquê de certos factores influenciarem positivamente ou negativamente o coeficiente de atrito. Uma vez que o coeficiente de atrito corresponde à relação entre a força normal e a força tangencial, e, sabendo que o aumento da área de contacto real entre as duas superfícies leva a um aumento da força tangencial, verifica-se que um aumento da área de contacto impõe um aumento do coeficiente de atrito. Por este motivo, Skedung *et al.* (2010) [23] concluíram que papéis mais ásperos (com uma rugosidade superficial superior) têm um coeficiente de atrito inferior a papéis mais suaves. A influencia da suavidade de uma sonda para medição de atrito foi analisada [37]. Segundo os autores, quanto mais suave a sonda, mais elevado é o coeficiente de atrito. O motivo deste tipo de comportamento deve-se ao facto de sondas mais suaves terem uma menor rugosidade. Portanto, quando em contacto com a pele, a área de contacto real entre a sonda e a pele é superior, comparativamente a sondas com uma rugosidade superior.

É importante referir que todos os valores dos coeficientes de atrito apresentados nesta revisão de literatura são coeficientes de atrito dinâmico, os mais frequentemente investigados no seio da comunidade científica e com um interesse superior de acordo com as aplicações dos materiais em estudo. A utilização de papéis para uso

pessoal requer movimentos do papel sobre a pele em geral. No entanto, é irrelevante se o movimento é do papel em relação à superfície da pele ou vice-versa nos resultados obtidos, uma vez que, de acordo com a terceira lei de Newton, para toda a acção existe sempre uma reacção de igual intensidade e direcção, mas de sentido contrário.

Todo a informação apresentada neste subcapítulo teve como objectivo dar a conhecer algum do trabalho que tem sido desenvolvido na área da biotribologia, sendo que foi dado um maior foco ao papel. Também a pele foi analisada uma vez que, só conhecendo a pele é que é possível optimizar a percepção táctil de uma superfície. No capítulo seguinte irá ser dada informação acerca dos materiais utilizados neste estudo, bem como toda a metodologia experimental, desde os instrumentos utilizados até aos procedimentos para obter as amostras nas condições pretendidas. Inclusivamente, também irá ser descrito em detalhe como foram obtidos os vários parâmetros calculados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Após uma visão geral acerca dos conceitos teóricos e do trabalho que tem vindo a ser desenvolvido na área da biotribologia, principalmente na pele em contacto com o papel, irá agora ser descrita toda a informação acerca dos materiais utilizados, bem como dos métodos experimentais e teóricos. É de referir que toda a análise de resultados e tratamento de dados foi executada recorrendo ao software Microsoft Excel 2016.

2.1. Materiais

Para a realização de todo o trabalho experimental foram seleccionadas 7 amostras de papel sendo que, uma das amostras corresponde ao papel de impressão e as restantes 6 amostras correspondem 6 diferentes tipos de papel utilizado para higiene pessoal. O papel de impressão foi seleccionado para este estudo na medida em que, é acerca deste tipo de papel que existem mais trabalhos realizados. Sendo assim, esta tipo de papel pode ser utilizado como uma referência.

As diferentes amostras foram seleccionadas na tentativa de englobar uma vasta gama dos mais variados tipos de papel utilizados para higiene pessoal no dia-a-dia, quer ao nível das percepções tácteis, quer ao nível das propriedades tácteis.

Na Figura 2.1 são apresentadas as 7 amostras seleccionadas, sendo que foi atribuída uma letra minúscula a cada uma delas. Também é possível observar uma imagem micrográfica de cada amostra, obtida através de um microscópio óptico (OM Leica DM 4000M LED). Além disso, cada imagem micrográfica é composta por uma imagem menor, onde cada tipo de papel está representado no local geralmente utilizado, de acordo com a aplicação por parte do consumidor final.

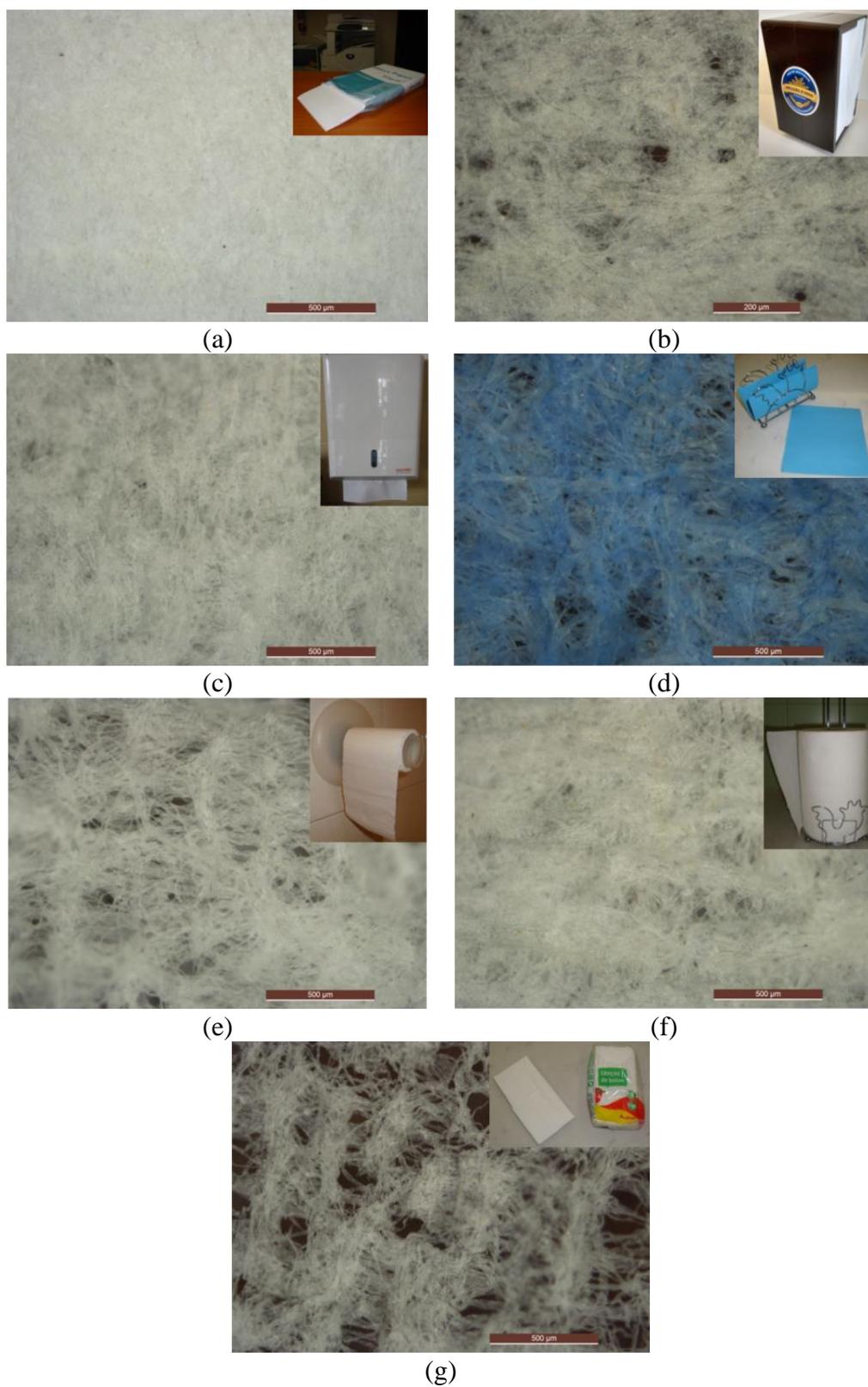


Figura 2.1. Diferentes amostras utilizadas no âmbito deste trabalho. a) Papel de impressão; b) Papel de bar; c) Toalha de papel; d) Guardanapo de papel; e) Papel higiénico; f) Rolo de papel de cozinha; g) Lenço de papel.

O papel de impressão, Figura 2.1(a), também conhecido como papel sulfite devido à adição de sulfito de sódio na sua produção, é um papel normalmente utilizado em impressoras e fotocopiadoras. Através da análise da imagem micrográfica, observa-se que este é um dos papéis com uma densidade mais elevada comparativamente às restantes amostras. Isto verifica-se devido à elevada compactação das fibras e à ausência de espaços vazios entre fibras que é possível observar na Figura 2.1 (a). Além disso, este é um dos papéis mais lisos, ou seja, com uma rugosidade superficial reduzida.

O papel da Figura 2.1(b), papel de bar, é um papel com uma utilização equivalente à dos guardanapos de papel e, normalmente encontra-se em bares e cafetarias. Este papel apresenta uma rugosidade com um padrão repetitivo, que faz com que as duas faces do papel sejam diferentes, ou seja, com uma face positiva e uma face negativa. Apesar disso, este é um dos papéis com uma menor espessura.

A toalha de papel, Figura 2.1(c), é utilizada geralmente para limpar as mãos. Encontra-se frequentemente em casas de banho, nomeadamente em casas de banho públicas. É constituído por duas folhas, facilmente separáveis, e tem como principal função a absorção de água. Ao nível da rugosidade, este papel também apresenta uma face positiva e uma face negativa.

O guardanapo de papel, Figura 2.1(d), normalmente utilizado à refeição, tem como função básica a higienização dos dedos e dos lábios. Também é importante que seja facilmente dobrável. Através da visualização da imagem micrográfica, verifica-se que este é um papel com uma densidade baixa. Também se verifica que as fibras estão dispostas de uma forma aleatória. Este é também um papel que apresenta um padrão repetitivo na sua rugosidade.

O papel higiénico, Figura 2.1(e), utilizado para a higiene íntima, é um papel absorvente que se desintegra em contacto com a água. Este papel é constituído por duas folhas. De acordo com a imagem micrográfica, este é um papel que aparenta ter uma baixa densidade.

O rolo de papel de cozinha, Figura 2.1(f), é um tipo de papel multiusos. Tanto pode ser utilizado por exemplo para limpar vidros, como também é utilizado como substituto do guardanapo de papel. Este é sem dúvida o papel com a espessura mais elevada. Este papel também apresenta um padrão na rugosidade, no entanto, as duas faces

são semelhantes. Devido à sua elevada espessura e flexibilidade, este papel, em princípio, irá ter uma baixa densidade.

O lenço de papel, Figura 2.1(g), utilizado frequentemente para a higiene do nariz, é constituído por duas folhas. A par do papel de impressão este é também um dos papéis mais lisos. Através da análise da imagem micrográfica, poder-se-ia pensar que este seria o papel com a densidade inferior, no entanto, tal não acontece, pois, a imagem micrográfica foi obtida utilizando apenas uma das folhas constituintes do lenço de papel.

2.2. Métodos

No âmbito deste estudo foram realizados três trabalhos experimentais distintos. Foram realizados ensaios de tracção, testes de atrito e, por último, foram realizados questionários e testes de percepção táctil. Após a conclusão destas etapas, foram feitas comparações entre as diversas propriedades, tanto físicas, como tácteis.

2.2.1. Ensaios de Tracção

Antes de iniciar a descrição dos métodos utilizados para a realização dos ensaios de tracção, é importante referir um detalhe. Neste estudo foi utilizado um termo de comparação, que é frequentemente o mais utilizado pelos investigadores na área da biotribologia. Os vários tipos de papel foram comparados de acordo com as propriedades da estrutura de cada material, ou seja, que dependem da geometria. Inclusivamente é este o termo de comparação referido na norma ASTM D828, a qual foi seguida para a realização dos ensaios de tracção e respectivo tratamento de dados. Também poderia ter sido realizada uma comparação relacionada com as propriedades mecânicas intrínsecas de cada material, ou seja, independentes da sua geometria. A comparação entre os vários materiais torna-se independente da geometria a partir do momento em que a espessura é tida em conta para a obtenção das várias propriedades mecânicas. No entanto, através da análise desse tipo de comparação, foi verificado que os resultados pouco se alteravam, comparativamente aos resultados analisados de acordo com a norma ASTM D828. A máquina utilizada para a execução dos ensaios de tracção denomina-se de Shimadzu Autograph AG-X 1 kN (Figura 2.2) e é composta por uma célula de carga de 5 kN. Este equipamento foi operado a uma velocidade de deformação constante.

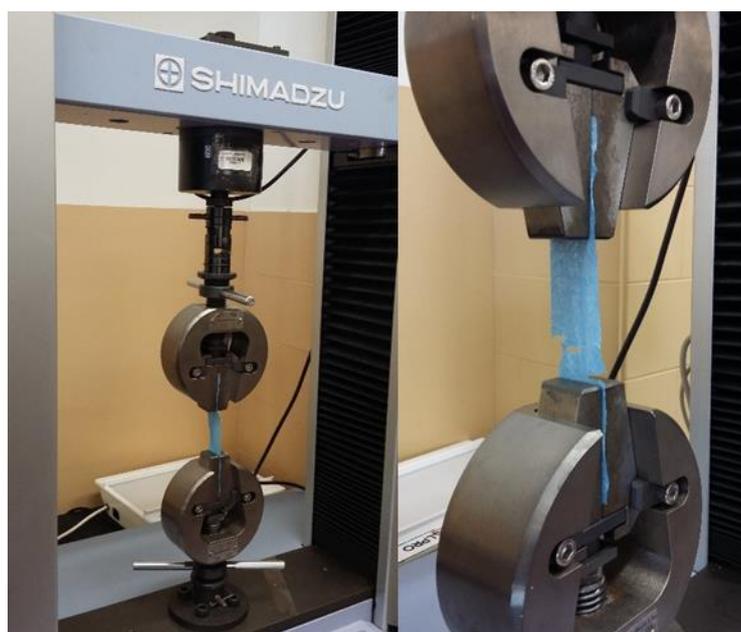


Figura 2.2. Amostra de papel inserida na máquina de tracção depois do ensaio ter terminado. Para este exemplo, a amostra visível na figura é de um guardanapo de papel.

Relativamente à preparação das amostras, inicialmente foi feito um esboço com o auxílio de um lápis e de uma régua, e posteriormente as amostras foram recortadas com uma tesoura. As amostras eram de secção rectangular e tinham as seguintes dimensões: $25,4 \pm 0,5 \text{ mm}$ de largura, $50 \pm 0,5 \text{ mm}$ de comprimento entre amarras e 120 a $150 \pm 0,5 \text{ mm}$ de comprimento total. Por exemplo, para o papel higiénico não foi possível obter amostras com um comprimento total de 150 mm , por causa da limitação do comprimento de cada tira de papel. No entanto, esta variação no comprimento total não teve influência nos resultados pois o mais importante é o comprimento entre amarras, que foi mantido constante ao longo do estudo.

Previamente ao esboço para posterior recorte das amostras, foram verificadas as condições em que cada tipo de papel se encontrava relativamente a anomalias tais como vincos, furos, rugas ou outras características não típicas do próprio papel que pudessem afectar negativamente os resultados obtidos.

Os ensaios foram realizados na direcção DM, a uma velocidade de deformação correspondente a $7,1 \text{ mm/min} \pm 0,1\%$. Posteriormente foram realizados ensaios a uma velocidade de deformação de $25,4 \text{ mm/min} \pm 0,1\%$ de forma a comparar o efeito da alteração da velocidade de deformação nas propriedades mecânicas.

Antes de iniciar os ensaios, foi necessário definir na máquina qual seria a distância entre apertos. Em primeiro lugar, aproximou-se a amarra superior à amarra inferior o máximo possível, através do controlador da máquina de tracção. De seguida, uma vez que a amarra inferior era estática, foi zerada a posição da amarra superior e, novamente através do controlador, a amarra superior foi afastada 50 *mm* em relação à inferior. Após a definição da distância entre amarras na máquina de tracção, foram sucessivamente colocadas as amostras, uma a uma, para a realização dos testes.

Para cada tipo de papel foram realizados cinco ensaios, ou seja, isto quer dizer que todos os parâmetros médios obtidos através da realização dos ensaios de tracção correspondem a uma média de cinco valores.

Nos subcapítulos seguintes são abordados os vários parâmetros determinados através dos ensaios de tracção, nomeadamente, a resistência à tracção e a deformação à rotura, a rigidez à tracção e a absorção de energia à tracção.

2.2.1.1. Resistência à Tracção e Deformação à Rotura

A resistência à tracção corresponde à tensão máxima que um material pode suportar, antes que ocorra a rotura. Teoricamente, corresponde ao ponto máximo de uma curva de tensão em função da deformação. Relativamente ao papel, este parâmetro é indicativo da sua durabilidade e utilidade. Os seus valores irão ser apresentados em unidades de *N/m*, normalizando o esforço de tracção com a largura do provete testado.

Por outro lado, a deformação à rotura corresponde ao aumento do comprimento de um material (na direcção dos esforços de tensão), desde o momento inicial do ensaio até ao momento em que ocorre a rotura. Como o aumento de comprimento é normalizado pelo comprimento inicial entre amarras, esta propriedade é adimensional e os seus valores irão ser apresentados em percentagem. Quanto à sua importância a nível prático, a deformação é indicativa da capacidade do papel em conformar num contorno desejado.

Antes de demonstrar como se determinam estes dois parâmetros, é importante referir que no procedimento de ensaio que foi definido apenas se fez aquisição de dados dos valores de força, deslocamento e tempo. Logo, tanto a tensão de tracção como a deformação têm de ser calculadas por pós processamento.

Assim, a deformação pode ser calculada com base na expressão

$$\varepsilon = \frac{\Delta c}{c} \times 100 \quad (2.1)$$

onde Δc é o deslocamento da amostra e c o comprimento (entre amarras) inicial da amostra que corresponde a 50 mm .

Para calcular os valores da tensão de tracção basta apenas dividir os valores da força de tracção pela largura da amostra em estudo, de acordo com a expressão

$$\sigma = \frac{F}{l} \quad (2.2)$$

sendo F a força de tracção e l a largura (inicial) da amostra, que corresponde a $25,4\text{ mm}$.

Na Figura 2.3, está exemplificado o modo de determinar graficamente, tanto a resistência à tracção como a deformação à rotura.

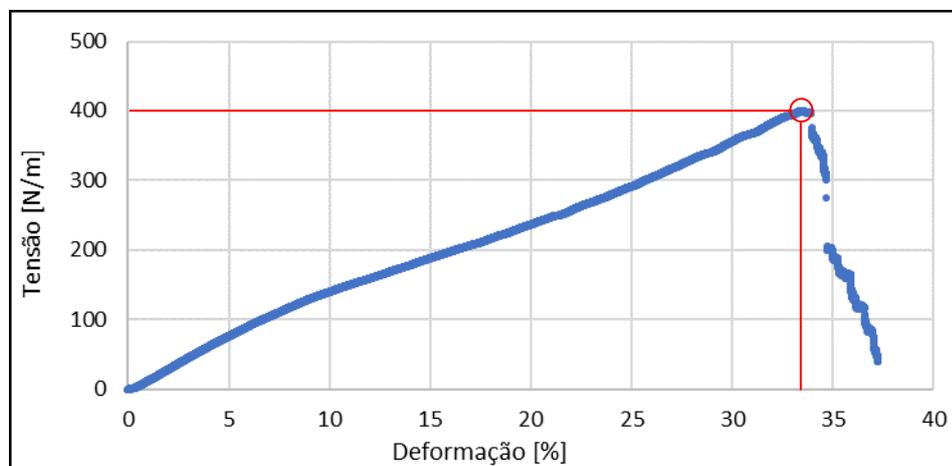


Figura 2.3. Exemplo de uma curva de evolução da tensão de tracção em função da deformação.

Tanto nesta figura, como em todas as restantes figuras que se encontram no subcapítulo 2.2., a curva representada, que serve como exemplo, corresponde a uma amostra de uma toalha de papel (c). Para o exemplo representado na figura 2.3 a resistência à tracção seria de sensivelmente 400 N/m , enquanto que a deformação à rotura seria de aproximadamente 33%.

2.2.1.2. Rigidez à Tracção

A rigidez à tracção define-se como a relação entre a força aplicada e o alongamento produzido. As suas unidades são apresentadas em N/m . Quando a relação tensão-deformação é linear, o seu valor pode ser determinado através da seguinte expressão:

$$k = \frac{F}{\Delta c} \quad (2.3)$$

Na equação 2.3, F corresponde à força de tracção e Δc ao deslocamento da amostra.

Na prática, o valor da rigidez à tracção corresponde ao declive da recta de força em função do deslocamento no regime elástico. O declive foi obtido através do modelo de regressão linear simples. Este foi o método utilizado uma vez que, segundo a equação 2.3, verifica-se que teoricamente k apresenta um comportamento linear e, deste modo, é válida a utilização deste modelo.

Para efeitos de tratamento de dados, a região elástica sobre a qual a regressão linear foi realizada, teve início num valor de carga não inferior a 5% do limite elástico, e não excedeu os 75%. Além disso, os dados utilizados no intervalo referido anteriormente compreenderam pelo menos 20% da região elástica dos dados de cada ensaio, como indicado na norma ASTM D828.

Através da utilização do modelo de regressão linear num determinado intervalo, obtém-se a equação geral da recta,

$$y = mx + b_1, \quad (2.4)$$

para os pontos seleccionados, onde y corresponde ao valor da força de tracção F , x corresponde ao deslocamento Δc , m é o declive da recta e b_1 representa a intercepção da recta com o eixo vertical (de acordo com o modelo teórico). Como já foi referido anteriormente, a rigidez à tracção corresponde ao valor do declive da recta. Este parâmetro é calculado através da seguinte expressão:

$$m = \frac{n_1 \sum xy - (\sum x) \times (\sum y)}{n_1 \sum(x)^2 - (\sum(x))^2} \quad (2.5)$$

onde n_1 representa o número de pontos utilizados para a análise da regressão linear.

Todas as regressões lineares efectuadas apresentaram um coeficiente de determinação, R^2 , superior a 0,99, ou seja, isto demonstra o quão bem este modelo se ajustou à recta obtida experimentalmente.

Na Figura 2.4 está representado um exemplo de uma secção de dados seleccionada, em regime elástico, para determinar a rigidez à tracção.

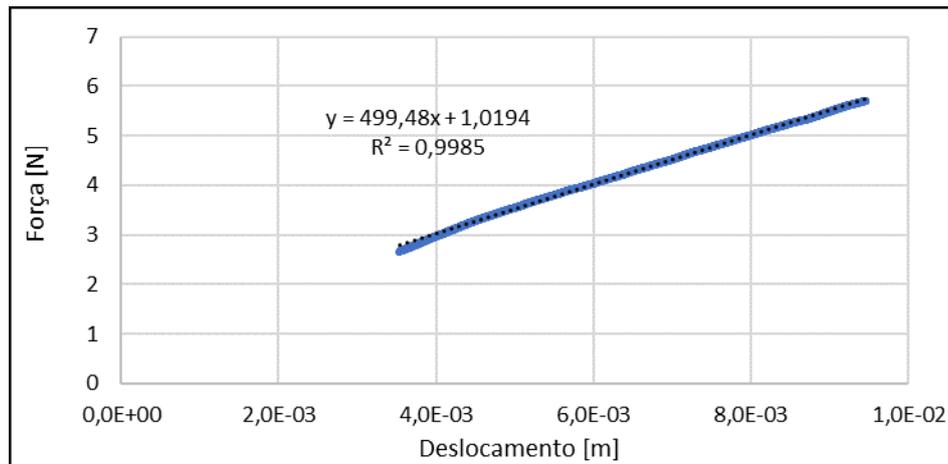


Figura 2.4. Exemplo de uma secção de uma curva de evolução da força de tracção em função do deslocamento, com a linha de tendência linear. Esta secção encontra-se em regime elástico.

Para o exemplo apresentado na Figura 2.4, o valor que se obteve para a rigidez à tracção foi de aproximadamente 500 N/m , com um coeficiente de determinação correspondente a 0,99.

2.2.1.3. Absorção de Energia à Tracção

A absorção de energia à tracção mede a capacidade que um determinado papel tem em absorver energia à velocidade de deformação do ensaio realizado, e indica a durabilidade de papéis que estão sujeitos a tensões e esforços repetitivos. Este parâmetro é apresentado em J/m^2 , tal como indicado na norma ASTM D828, e pode ser calculado da seguinte forma:

$$E_T = \frac{1 \times 10^6 \times A_{fd}}{c \times l} \quad (2.6)$$

sendo que A_{fd} representa a área abaixo da curva de força em função do deslocamento, c representa o comprimento (entre amarras) inicial da amostra e l corresponde à largura da amostra.

Os valores de c e l foram medidos, enquanto que o valor de A_{fd} foi calculado recorrendo à regra do ponto médio, de acordo com a seguinte expressão:

$$A_{fd} = \int_a^b f(\Delta c) d(\Delta c) \approx \sum_{i=a}^{b-1} \left[((\Delta c)_{i+1} - (\Delta c)_i) f\left(\frac{(\Delta c)_i + (\Delta c)_{i+1}}{2}\right) \right] \quad (2.7)$$

onde $(\Delta c)_i$ corresponde aos valores dos pontos (de índice i) de deslocamento, pertencentes ao intervalo entre a e b . O intervalo entre a e b corresponde ao intervalo entre o deslocamento inicial a , equivalente a zero, e o deslocamento final b , onde ocorre a rotura. Resumidamente, a equação 2.7 afirma que a área A_{fd} é dada pelo somatório da área de todos os rectângulos formados abaixo da curva de força em função do deslocamento. Esta área está compreendida no intervalo entre a e b , em que $(x_{i+1} - x_i)$ corresponde à largura (horizontal) de cada um dos rectângulos e $f\left(\frac{x_i+x_{i+1}}{2}\right)$ corresponde ao comprimento (vertical) do ponto médio da largura (horizontal) de cada um dos rectângulos. O número de rectângulos é determinado pelo número de incrementos em cada ensaio até ao momento da rotura menos um.

Este foi o método mais adequado para o cálculo de A_{fd} pois, além de ser um dos métodos mais simples, para um número elevado de pontos o seu erro é bastante reduzido. As unidades de A_{fd} são apresentadas em Joules, equivalente a $N \cdot m$.

Na Figura 2.5, está representado um exemplo de como se determina a área A_{fd} , com um número bastante inferior de rectângulos comparativamente à realidade, de modo a entender melhor a regra do ponto médio.

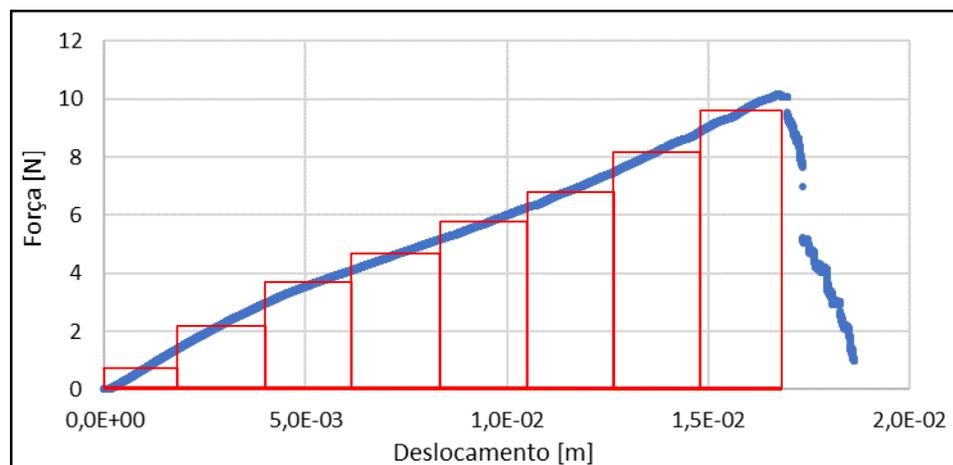


Figura 2.5. Exemplo de uma curva de evolução da força de tracção em função do deslocamento.

É necessário ter em atenção que a absorção de energia à tracção é calculada até à rotura, portanto, todos os pontos superiores ao deslocamento na rotura não entram no cálculo da área A_{fd} .

2.2.2. Testes de Atrito

O atrito entre a pele e os sete diferentes tipos de papel foi medido *in vivo*. Para isso, o atrito foi medido em duas regiões anatómicas distintas sendo que, todos os testes foram realizados apenas por um indivíduo, o autor da presente dissertação. Relativamente às características principais do indivíduo que pudessem influenciar os resultados, este é de etnia caucasiana, é do género masculino e na altura em que realizou os testes tinha 24 anos. Além disso, aparentemente não apresentava problemas de pele. Todos os testes foram realizados com a pele em condições normais, ou seja, previamente aos ensaios não houve adição de cremes hidratantes ou de outros produtos na pele que pudessem alterar o seu nível de hidratação.

2.2.2.1. Condições dos Ensaios

As regiões anatómicas estudadas foram a palma da mão e a face ventral do antebraço (Figura 2.6), sendo estas, duas das regiões anatómicas mais estudadas. Além disso, são duas zonas que apresentam comportamentos distintos, conforme descrito na revisão de literatura [26]. Também a maior facilidade na realização dos testes foi um factor a ter em conta. Todos os testes foram realizados na direcção longitudinal, tanto do antebraço como da palma da mão.

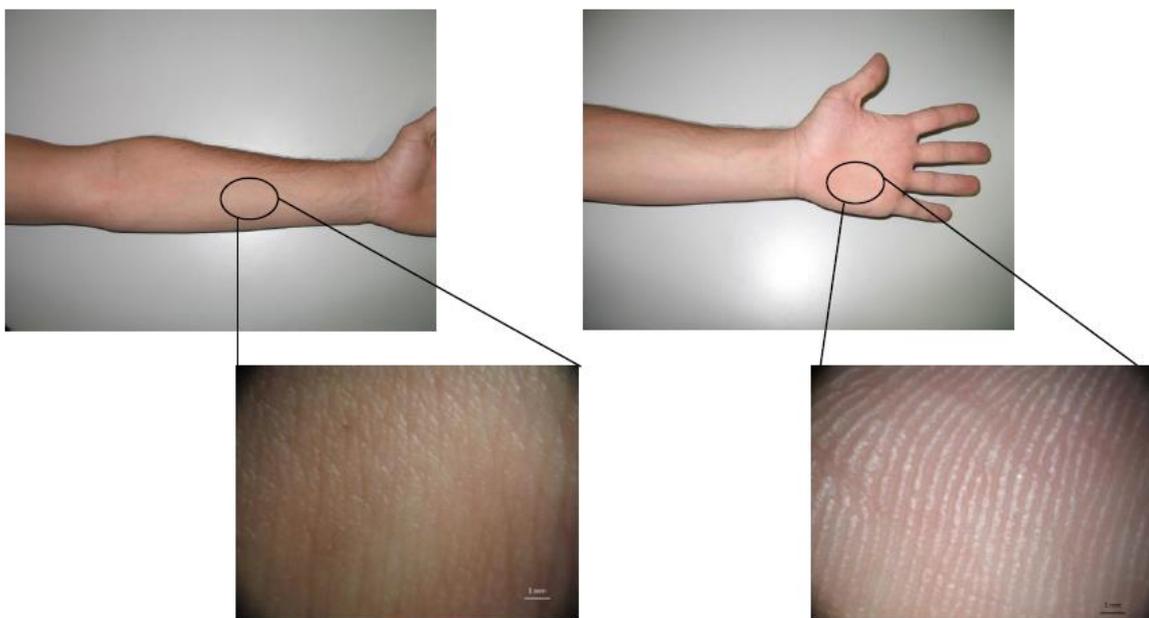


Figura 2.6. Regiões anatómicas em estudo e respectivas ampliações. À esquerda está representada a face ventral do antebraço e à direita está representada a palma da mão [38].

Todos os testes foram realizados a uma temperatura ambiente de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ e a uma humidade relativa ambiente de $55 \pm 10\%$. Foram utilizadas diferentes condições de ensaio dependendo da região anatómica a ser testada, no entanto, a velocidade de deslizamento e a força normal máxima exercida foram iguais para ambas as regiões. A velocidade foi constante e igual a $60 \pm 10 \text{ mm/s}$, enquanto que a carga normal aplicada foi crescente, sendo que o seu máximo tomou o valor de $11 \pm 2 \text{ N}$. Posto isto, apenas a distância de deslizamento foi diferente em cada região anatómica. Enquanto que na palma da mão foi utilizada uma distância de deslizamento de $75 \pm 5 \text{ mm}$, na face ventral do antebraço essa mesma distância foi de $105 \pm 5 \text{ mm}$.

O único parâmetro que variou no decorrer dos testes foi a humidade relativa do papel. Foi estudada a influencia deste parâmetro no coeficiente de atrito dinâmico. Para isso, foram feitos ensaios a três humidades relativas diferentes, em todos os tipos de papel. Inicialmente, os ensaios foram realizados a uma humidade relativa ambiente de $55 \pm 10\%$, e mais à frente, foram feitos testes a humidades relativas de $32 \pm 2\%$ e de $83 \pm 2\%$. Foi possível obter estas humidades relativas diferentes da humidade relativa ambiente através do método descrito no subcapítulo 2.2.2.4, no qual foram utilizadas diferentes soluções salinas.

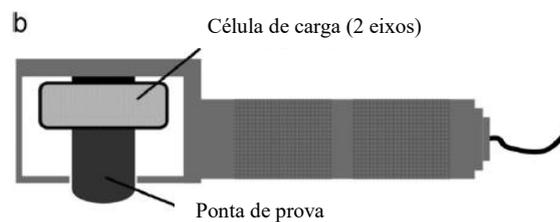
Todos os valores de coeficiente de atrito dinâmico determinados correspondem a uma média de três ensaios. Quer isto dizer que ao todo foram realizados 126 ensaios, ou seja, três ensaios em cada região anatómica, variando a humidade relativa do papel e nos sete diferentes tipos de amostras.

2.2.2.2. Equipamentos e sua Calibração

Para a realização dos testes, foi utilizada uma sonda de medição portátil (tribómetro), como ilustrado na Figura 2.7.



(a)



(b)

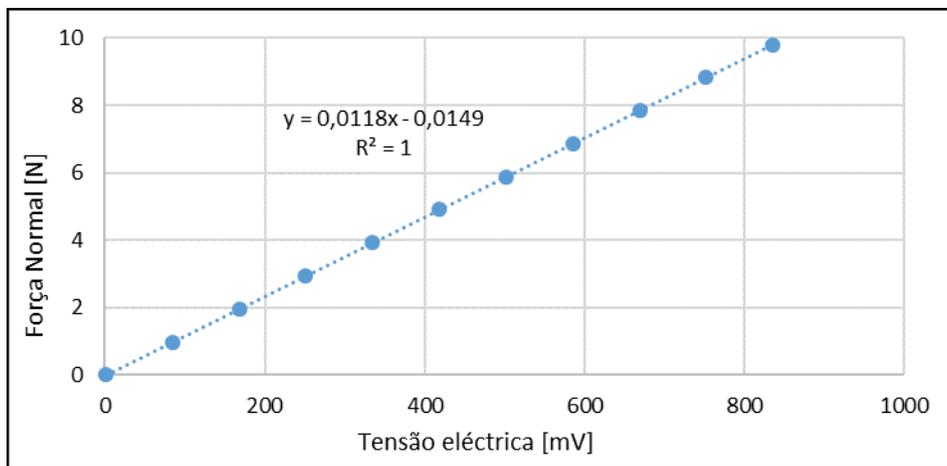
Figura 2.7. Sonda de medição portátil: (a) imagem da sonda com uma amostra de papel fixa a uma ponta de prova através de um *O-ring*; (b) imagem esquemática do sensor de força de dois eixos (adaptação de [30]).

Os testes foram realizados deslizando as amostras de papel, fixas ao tribómetro através de um O-ring, sobre a superfície da pele na região anatómica em estudo. Este equipamento é de accionamento manual e, portanto, foi necessário algum cuidado para manter sempre a ponta de prova normal à superfície da pele e perpendicular à direcção de deslizamento, de modo a minimizar o erro associado. A superfície da ponta de prova, em PVC, sobre a qual é colocada a amostra de papel, tem uma superfície esférica suave de modo a evitar os efeitos de aresta.

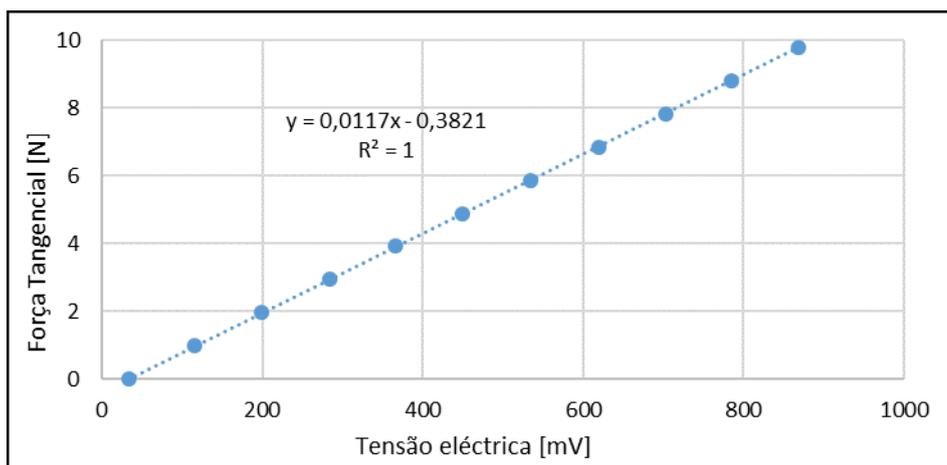
Além da ponta de prova, este tribómetro baseia-se num sensor de força de dois eixos. O sensor de força é composto por duas células de carga que se baseiam na variação da resistência Ohmica de um extensómetro. Num eixo mede-se a força normal e no outro a força tangencial, em que foram exercidas sobre a ponta de prova durante a realização dos testes.

O tribómetro está conectado a uma placa de conversão analógico-digital, A/D, de forma a ser permitida a aquisição de dados pelo computador durante os testes. Tendo em conta que os valores da força normal e tangencial na unidade de aquisição de dados são

obtidos em unidades de tensão eléctrica, foi necessário proceder à calibração das células de carga anteriormente à realização dos testes, tal como ilustrado na Figura 2.8.



(a)



(b)

Figura 2.8. Rectas de calibração da célula de carga. Em abcissas está representada a tensão medida à saída do amplificador e em ordenadas está representada a força aplicada na célula de carga. (a) – Direcção normal; (b) – Direcção tangencial.

Na calibração efectuada, é possível observar (Figura 2.8) que ambas as forças estão bem relacionadas linearmente com os valores de tensão. Além disso, o coeficiente de determinação é máximo (igual a 1). Para converter os valores de tensão em força, bastou apenas multiplicar a tensão pelo declive da recta (factor de calibração), m , dependendo da direcção da força (normal ou tangencial). Desta forma, utiliza-se a seguinte expressão:

$$F_c = m \times T \tag{2.8}$$

sendo que m é o declive da recta e T a tensão eléctrica.

Após a calibração, foram realizados testes preliminares em três tipos diferentes de papel a deslizar sobre a palma da mão, de forma a verificar se o tribómetro teria sensibilidade suficiente para distinguir os diversos materiais. Só no fim da calibração e dos testes preliminares é que se procedeu ao início dos testes de atrito nas várias amostras.

2.2.2.3. Coeficiente de Atrito Dinâmico

O coeficiente de atrito dinâmico é uma grandeza adimensional, e expressa a relação que existe entre a força tangencial e a força normal, que são geradas quando ocorre um movimento relativo entre dois corpos em contacto. Para uma determinada força normal exercida, quanto maior a força tangencial, maior será o coeficiente de atrito. De acordo com a lei de Amontons-Coulomb, o seu valor pode ser determinado através da expressão,

$$F_t = \mu \times F_n \quad (2.9)$$

onde F_t corresponde à força tangencial, F_n à força normal e μ ao coeficiente de atrito. De acordo com este modelo, a força de atrito é proporcional à força normal sendo que o coeficiente de proporcionalidade corresponde ao coeficiente de atrito.

Analisando a equação 2.9, o valor do coeficiente de atrito corresponde ao declive da curva de evolução da força tangencial em função da força normal. O declive foi obtido através do modelo de regressão linear simples, como explicado no subcapítulo 2.2.1.2 e de acordo com as equações 2.4 e 2.5. Nestas equações, y corresponde ao valor da força tangencial F_t , e x corresponde ao valor da força normal F_n .

Na Figura 2.9 está representado graficamente, um exemplo de como o coeficiente de atrito foi obtido.

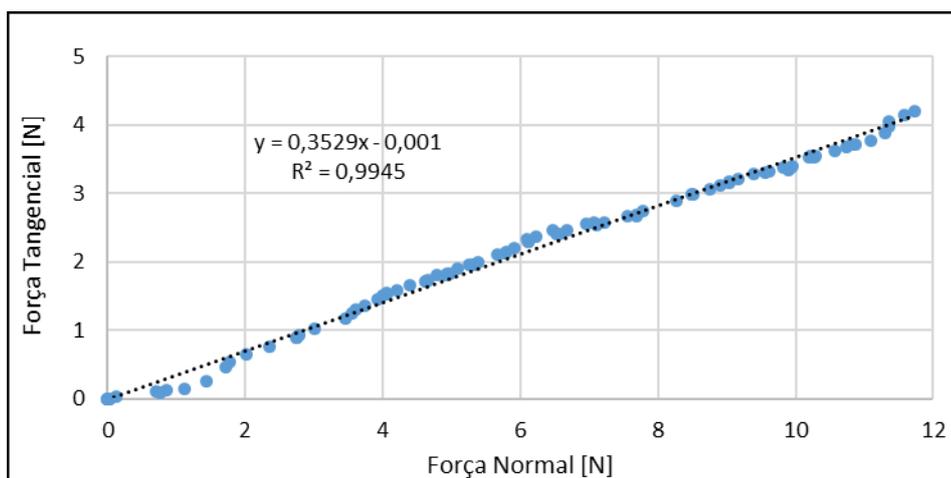


Figura 2.9. Exemplo de uma curva de evolução da força tangencial em função da força normal, com a linha de tendência linear.

Para o exemplo apresentado na Figura 2.9, onde se pode observar a evolução da força tangencial em função da força normal, o valor que se obteve para o coeficiente de atrito dinâmico foi de aproximadamente 0,35, com um coeficiente de determinação de 0,99.

2.2.2.4. Humidade Relativa do Papel

Como já foi referido anteriormente, foram realizados testes de atrito considerando três diferentes humidades relativas do papel (32, 55 e 83%). Desta forma, à excepção das amostras testadas à humidade relativa ambiente ($55 \pm 10\%$), foi necessário colocar as amostras em ambientes com humidade relativa controlada através de soluções salinas saturadas (Figura 2.10).



Figura 2.10. Exemplo de amostras em ambiente controlado de humidade relativa via solução salina saturada.

Foram utilizadas duas caixas de um material polimérico, com tampa e impermeáveis, onde para cada humidade relativa pretendida foi utilizado um sal diferente. Para obter a humidade relativa de $32 \pm 2\%$ foi utilizado acetato de potássio (CH_3COOK), enquanto que, para obter a humidade relativa de $83 \pm 2\%$ foi utilizado sulfato de potássio (K_2SO_4). Estes sais foram colocados em recipientes sendo que lhes foi adicionada água desionizada até formar uma pasta. Após a preparação dos sais estar completa, os recipientes e as amostras foram colocados nas respectivas caixas. Depois as caixas foram fechadas, sendo que as amostras permaneceram em ambiente controlado durante um dia.

É importante referir que as amostras colocadas em ambientes controlados foram testadas com uma humidade relativa diferente da humidade relativa ambiente. Assim sendo, para que não houvessem alterações na humidade relativa das amostras, estas foram testadas nos instantes seguintes após terem sido retiradas das caixas em ambientes controlados. Este procedimento não causou qualquer tipo de erro significativo uma vez que a variação de humidade é um processo bastante lento.

2.2.3. Questionário para Determinar a Percepção Táctil

Este estudo teve como principal objectivo avaliar algumas das principais propriedades tácteis do papel, através do toque. Para isso, 29 voluntários (10 do sexo feminino e 19 do sexo masculino), com idades compreendidas entre os 19 e os 58 anos, responderam a 2 questionários (ver Anexo B). Estes questionários foram adaptados, sendo que foram feitas ligeiras alterações, de um estudo realizado anteriormente sobre têxteis

[38]. As características de cada voluntário e as condições de temperatura e humidade relativa durante cada teste podem ser visualizadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Características de cada voluntário e condições ambiente durante os testes. Na coluna do género: F – sexo feminino; M – sexo masculino.

Voluntário	Idade	Género	Temperatura do Espaço [°C]	Humidade Relativa Ambiente [%]
1	23	M	30	43
2	24	M	28	42
3	24	M	28	42
4	20	F	28	42
5	24	M	28	50
6	24	M	28	50
7	24	M	28	50
8	24	M	28	50
9	23	M	28	50
10	45	M	28	50
11	24	M	28	50
12	24	M	27	66
13	23	M	27	56
14	19	M	26	60
15	29	F	26	60
16	26	M	25	60
17	30	F	25	60
18	58	F	25	60
19	28	F	25	60
20	57	M	24	60
21	54	M	24	60
22	55	F	24	60
23	50	F	24	60
24	49	M	23	60
25	43	F	23	60
26	23	F	22	58
27	52	F	22	58
28	31	M	20	56
29	56	M	20	56

No primeiro questionário, foram feitas várias perguntas acerca dos hábitos pessoais, que pudessem ter influencia no estado da pele de cada indivíduo. Foram feitas questões como por exemplo a quantidade de água consumida semanalmente, se utilizavam produtos de tratamento para a pele, etc.

No segundo questionário, foi pedido a cada voluntário que avaliasse as propriedades tácteis de cada tipo de papel, numa escala de 1 a 5, e de acordo com as seguintes qualidades: suave-áspero; macio-duro; escorregadio-aderente; quente-frio e agradável-desagradável. Foram utilizados 6 materiais de referência, para servirem como termo de comparação, de modo a que a escala fosse o mais uniforme possível, e também, para que os voluntários percebessem melhor o significado de cada característica. Estes 6 materiais de referência foram utilizados em 3 das 5 qualidades tácteis avaliadas (suave-áspero; macio-duro e escorregadio-aderente) e estão apresentados na Tabela 2., de acordo com as características de percepção táctil.

Tabela 2.2. Papéis de referência utilizados de acordo com as características de percepção táctil.

Característica	Papel de referência
Suave	Papel de seda
Áspero	Papel crepe
Macio	Papel higiénico (de 4 folhas)
Duro	Cartolina
Escorregadio	Papel couché
Aderente	Lixa (de granulometria 2000)

É também de referir que cada característica estava associada a 2 níveis da escala, ou seja, o nível 1 e 2 estavam associados às características que se apresentavam do lado esquerdo do questionário (suave, macio, escorregadio, quente e agradável) e o nível 4 e 5 estavam associados às características que se apresentavam do lado direito (áspero, duro, aderente, frio e desagradável). Ao nível 3 correspondia o neutro. Por exemplo, para a avaliação da qualidade táctil suave-áspero a escala tinha o seguinte significado:

- 1) Muito suave
- 2) Um pouco suave
- 3) Neutro
- 4) Um pouco áspero
- 5) Muito áspero

Toda esta informação foi explicada a cada voluntário sendo que, foi esclarecida qualquer dúvida que estes pudessem ter. Além disso, foram medidas as condições em que os testes foram realizados, nomeadamente a temperatura e a humidade relativa ambiente.

Na Figura 2.11, é possível visualizar o material que foi utilizado para que cada voluntário pudesse responder a ambos os questionários.



Figura 2.11. Representação da realização dos questionários de percepção táctil.

Através da Figura 2.11 é possível observar duas caixas. Na caixa do lado esquerdo foram colocadas as várias amostras de papel. Estas amostras ficaram suspensas, através de um fio de costura, no interior da caixa. Na caixa do lado direito estavam os materiais de referência. Na parte superior de cada caixa estavam as devidas identificações. Em primeiro lugar os voluntários tocavam nos papéis de referência e, após perceberem o que significava cada característica, procediam à avaliação de cada amostra, uma de cada vez. Os voluntários, como se pode observar na Figura 2.11, estavam impedidos de visualizar tanto as amostras, bem como os materiais de referência. Em média cada teste completo, ou seja, a realização dos dois questionários por parte de cada voluntário, teve uma duração média de 15 a 20 minutos.

2.2.4. Outros

2.2.4.1. Gramagem e Espessura

A gramagem e a espessura foram as propriedades mecânicas determinadas que não necessitaram de ser obtidas através de ensaios experimentais. A gramagem corresponde à massa por unidade de área, g/m^2 , enquanto que a espessura foi medida em mm .

A gramagem foi determinada de acordo com a expressão,

$$\rho_A = \frac{M}{A} \quad (2.10)$$

sendo M e A a massa e a área de cada amostra, respectivamente. Basicamente, para determinar a gramagem das diferentes amostras, foi recolhida uma amostra de cada tipo de papel com uma determinada área conhecida e, de seguida, estas foram pesadas numa balança de precisão. Depois, apenas foi necessário utilizar a equação 2.10. Foram utilizadas áreas de amostra relativamente elevadas de modo a reduzir o erro associado.

A espessura dos vários tipos de papel foi medida através de um paquímetro e com o auxílio de duas lamelas de vidro (Figura 2.).



Figura 2.12. Imagem ilustrativa da medição da espessura das amostras.

Inicialmente foi medida a espessura resultante das duas lamelas. De seguida, foi colocada uma amostra de papel entre as duas lamelas e foi medida a espessura resultante. Este processo foi repetido para cada tipo de papel e todos os valores obtidos resultam de uma média de três medições. Por fim, para determinar a espessura, apenas foi necessário calcular a diferença entre a medição com o papel adicionado entre as lamelas e a medição apenas das lamelas.

Na Tabela 2. são apresentados os valores obtidos para a espessura e gramagem para cada tipo de papel.

Tabela 2.3. Valores de espessura e gramagem para os vários tipos de papel.

Amostra	Espessura [mm]	Gramagem [g/m ²]
a) Papel de impressão	0,23	84,22
b) Papel de bar	0,06	18,64
c) Toalha de papel	0,16	34,44
d) Guardanapo de papel	0,16	20,37
e) Papel higiênico	0,27	32,31
f) Rolo de papel de cozinha	0,65	42,82
g) Lenço de papel	0,23	62,63

2.2.4.2. Correlação entre Propriedades

Para verificar se determinadas propriedades estariam correlacionadas entre si, foram realizadas análises de correlação de Spearman. O coeficiente ρ de Spearman avalia a intensidade da relação entre duas variáveis ordinais. Em vez dos valores dos parâmetros analisados, este coeficiente utiliza apenas a sua ordem. Este coeficiente de correlação varia entre -1 e 1 , e, quanto mais próximo estiver destes extremos, mais forte é a correlação dos parâmetros analisados. Para valores próximos de 1 significa que existe uma correlação fortemente positiva, ou seja, as variáveis variam no mesmo sentido. Por outro lado, para valores próximos de -1 significa que existe uma correlação fortemente negativa, ou seja, as variáveis variam em sentidos opostos.

Para determinar o coeficiente ρ de Spearman utiliza-se a seguinte expressão:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n_2^3 - 1} \quad (2.11)$$

onde n_2 corresponde ao número total de pares de dados utilizados na análise estatística, enquanto que, d representa o somatório das diferenças dos valores ordinais associados aos parâmetros analisados.

Após uma análise detalhada sobre os materiais em estudo e toda a descrição dos métodos, quer experimentais, quer teóricos, irão ser apresentados no próximo capítulo os resultados obtidos mais importantes. Estes irão ser comparados com outros trabalhos que foram apresentados no capítulo 1.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como referido anteriormente, no presente capítulo apresentam-se os resultados obtidos mais importantes. É de salientar que os vários tipos de papel foram comparados de acordo com as propriedades mecânicas da estrutura de cada material, ou seja, dependem da geometria. Para as restantes comparações consideradas menos relevantes, consultar o Anexo A. É importante referir que todos os intervalos de confiança apresentados correspondem a uma probabilidade de 95%.

3.1. Factores que Influenciam o Coeficiente de Atrito

Foram realizados testes de atrito por um indivíduo entre a pele (em condições naturais) e vários tipos de papel. Foram realizados testes com cada tipo de papel a três humidades relativas distintas (32, 55 e 83%) e em duas regiões anatómicas, a palma da mão e o antebraço. Após uma análise de resultados de acordo com a lei de Amontons-Coulomb (capítulo 2.2.2.3), para a determinação do coeficiente de atrito, foram obtidos coeficientes de determinação superiores a 0,95 para o antebraço, e superiores a 0,80 para a palma da mão. Na Figura 3.1 estão apresentados os resultados obtidos para o coeficiente de atrito medidos no antebraço e na palma da mão, e com uma humidade relativa do papel de 55%. Os coeficientes de atrito obtidos para a pele a deslizar sobre alguns tipos de papel variaram entre 0,30 e 0,62. Estes valores são inferiores aos valores obtidos por Thieulin et al. (2017) [2] e Gee et al. (2005) [22], no entanto, como já foi esclarecido, os ensaios não foram realizados em condições semelhantes.

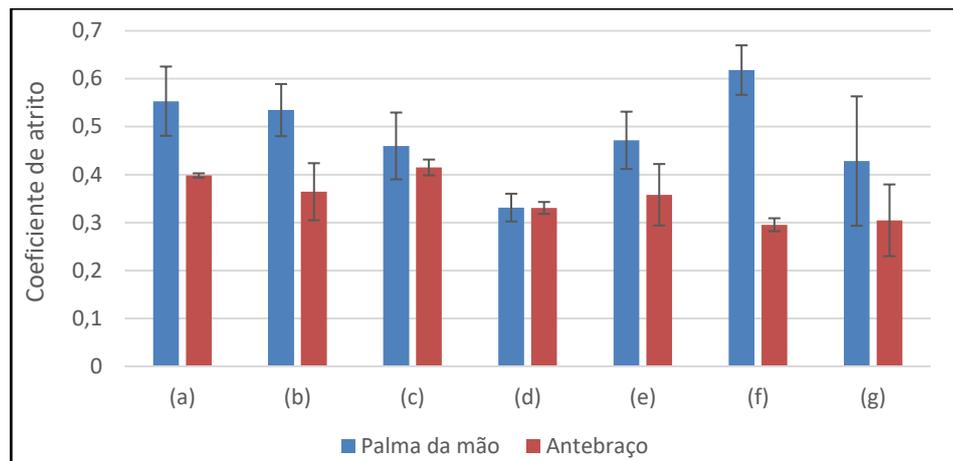
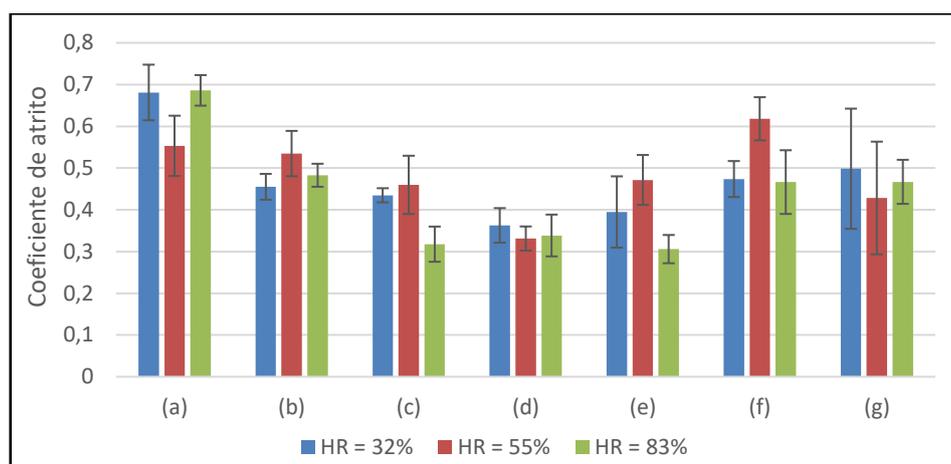


Figura 3.1. Coeficientes de atrito medidos no antebraço e na palma da mão a uma humidade relativa de 55%. a) Papel de impressão; b) Papel de bar; c) Toalha de papel; d) Guardanapo de papel; e) Papel higiênico; f) Rolo de papel de cozinha; g) Lenço de papel.

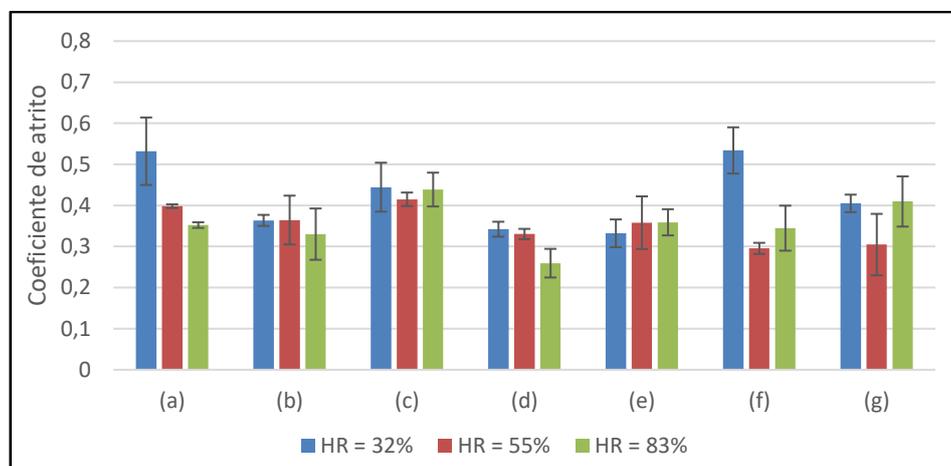
Através da análise da Figura 3.1, verifica-se que de facto o coeficiente de atrito é superior na zona da palma da mão, quando comparado à face ventral do antebraço. Este comportamento ocorre em todos os tipos de papel sendo que, em média o coeficiente de atrito na palma da mão é 25% superior ao coeficiente de atrito no antebraço. Estes resultados estão de acordo com Ramalho *et al.* (2007) [26]. Isto acontece porque a palma da mão é uma zona com mais humidade que o antebraço, devido à quantidade de suor excretado nesta zona ser superior. Também as propriedades da pele, principalmente a espessura, podem explicar os resultados obtidos. Nos ensaios em que o papel foi testado com uma humidade relativa de 32% e de 83%, este tipo de comportamento também se manteve, no entanto, de uma forma menos acentuada. Em geral, este comportamento manteve-se, tanto para 32% como para 83% de humidade relativa do papel. Para 32% de humidade relativa o atrito aumentou em média 10%, enquanto que para 83% de humidade relativa o atrito aumentou em média 12%.

É de referir também que foi verificado o mesmo comportamento observado por Ramalho *et al.* [26]. A palma da mão apresentou apenas um regime, com um coeficiente de atrito constante ao longo da variação da evolução da carga normal, enquanto que, a face ventral do antebraço apresentou um atrito caracterizado por dois regimes.

Na Figura 3.2 estão representados todos os coeficientes de atrito obtidos, o que permite fazer uma análise acerca da influência da humidade relativa no papel.



(a)



(b)

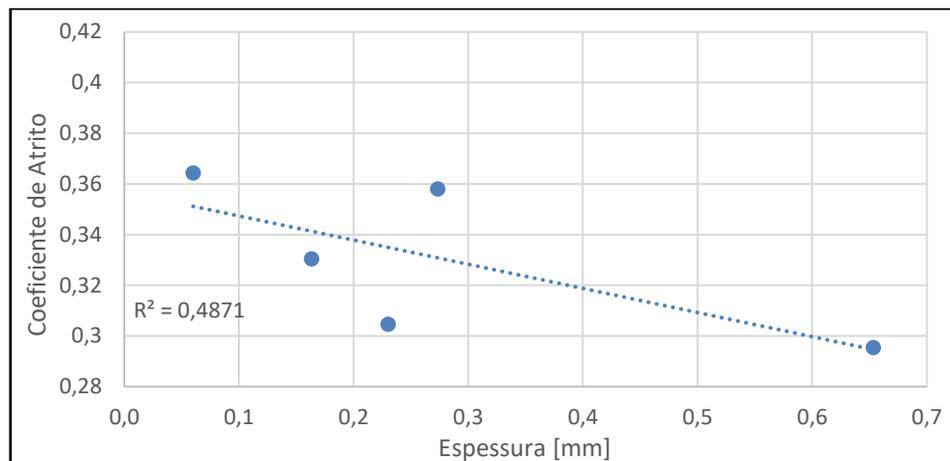
Figura 3.2. Coeficientes de atrito medidos na palma da mão (a) e no antebraço (b) a 3 humidades relativas diferentes. a) Papel de impressão; b) Papel de bar; c) Toalha de papel; d) Guardanapo de papel; e) Papel higiénico; f) Rolo de papel de cozinha; g) Lenço de papel.

Através da observação da Figura 3.2, não se nota nenhuma tendência óbvia acerca do comportamento do atrito no papel em função do teor de humidade relativa. Em algumas amostras o atrito altera-se de forma insignificante, o que poderá querer dizer que os diferentes papéis, em geral, estão a desempenhar bem a sua função, ou seja, as suas propriedades tribológicas não se alteram de acordo com o teor de humidade. Além disso, na maioria dos casos, o coeficiente de atrito com as amostras com uma humidade relativa ambiente, corresponde ao valor máximo ou mínimo das 3 humidades relativas. Isto pode significar, por outro lado, que os diferentes tipos de papel já foram otimizados em relação às suas propriedades tribológicas e de acordo com a sua finalidade em concreto.

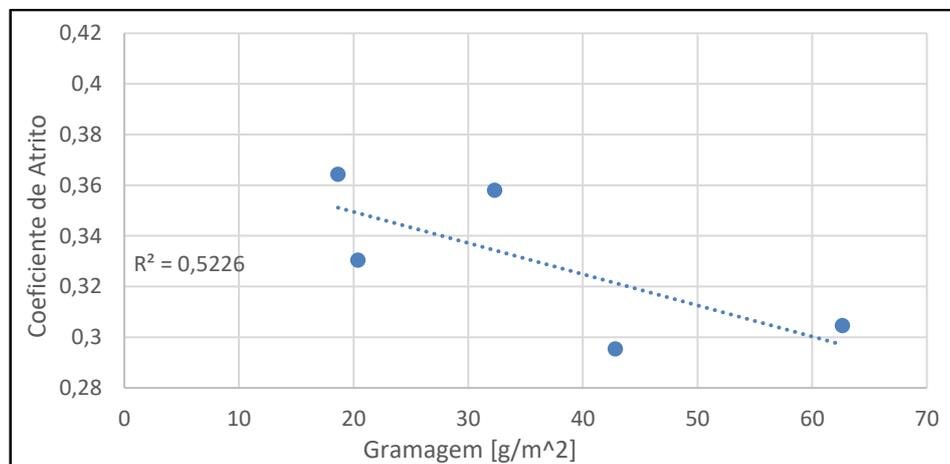
Relativamente à zona do antebraço, as amostras (a), (b) e (d) apresentam um decréscimo do atrito com o aumento da humidade.

Foram retiradas três conclusões em relação à influência da humidade relativa do papel no coeficiente de atrito, que poderão estar interligadas entre si. No entanto, nenhuma conclusão óbvia se verifica.

Também a espessura e a gramagem foram comparadas com o coeficiente de atrito. Em ambos os casos, foi encontrado um coeficiente de Spearman fortemente negativo, tomando o valor de $-0,70$ para a espessura e $-0,80$ para a gramagem. Quer isto dizer que aumentando a espessura ou a gramagem, o coeficiente de atrito diminui (Figura 3.3). Era expectável que o comportamento da espessura fosse semelhante ao da gramagem porque são dois parâmetros dependentes, ou seja, aumentando a espessura de um determinado tipo de papel, está a aumentar-se também a sua gramagem. Para se obterem estes valores do coeficiente de Spearman, as amostras de papel de impressão, (a), e de toalha de papel, (c), foram excluídas desta análise. Caso contrário, não existiria nenhuma correlação.



(a)



(b)

Figura 3.3. Comparação do coeficiente de atrito com a espessura (a) e com a gramagem (b). A figura mostra uma linha de tendência em cada um dos casos (a) e (b) e o respectivo coeficiente de determinação.

3.2. Comparação entre Propriedades Mecânicas e o Coeficiente de Atrito

Também as propriedades mecânicas foram comparadas com o coeficiente de atrito, nomeadamente a resistência à tracção, a deformação à rotura, a rigidez à tracção e a absorção de energia por tracção. Uma vez que cada material tem características diferentes, não se obtiveram correlações significativas entre o coeficiente de atrito e as várias propriedades mecânicas. No entanto, foram retiradas algumas amostras para o cálculo do coeficiente de Spearman, de modo a verificar se assim já existia alguma correlação.

Para a resistência à tracção, foi obtido um coeficiente de Spearman fortemente positivo de 0,94, excluindo as amostras (a) e (g), de papel de impressão e de lenço de papel, respectivamente. Isto pode indicar que um aumento da resistência à tracção pode resultar num aumento do coeficiente de atrito (Figura 3.). Para a deformação à rotura não foi encontrada nenhuma correlação significativa.

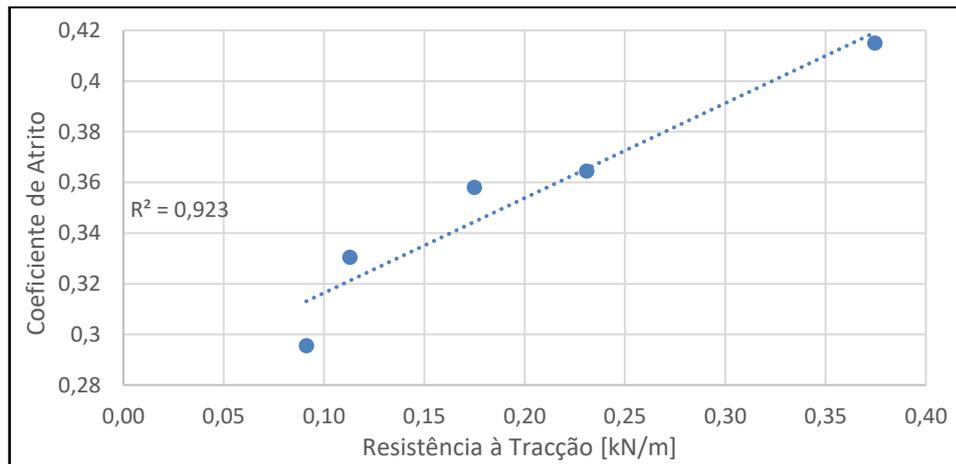


Figura 3.4. Comparação do coeficiente de atrito com a resistência à tracção. A figura mostra uma linha de tendência e respectivo coeficiente de determinação.

Para a rigidez à tracção, foi obtido um coeficiente de Spearman fortemente negativo de $-0,90$, excluindo as amostras (a) e (b), de papel de impressão e de papel de bar, respectivamente. Quer isto dizer que com o aumento da rigidez à tracção, o coeficiente de atrito diminui (Figura 3.5).

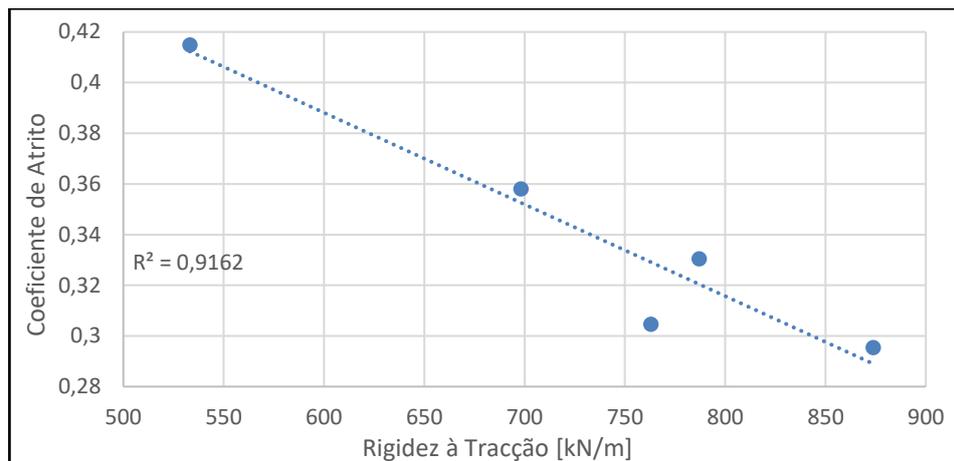


Figura 3.5. Comparação do coeficiente de atrito com a rigidez à tracção. A figura mostra uma linha de tendência e respectivo coeficiente de determinação.

No que toca à absorção de energia por tracção, foi obtido um coeficiente de Spearman positivo de 0,60, excluindo as amostras (f) e (g), de rolo de papel de cozinha e de lenço de papel. Esta correlação já não é tão forte como as anteriores. Apesar de tudo, existe uma certa tendência que aparenta indicar que o aumento da absorção de energia por tracção leva a um aumento do coeficiente de atrito (Figura 3.6).

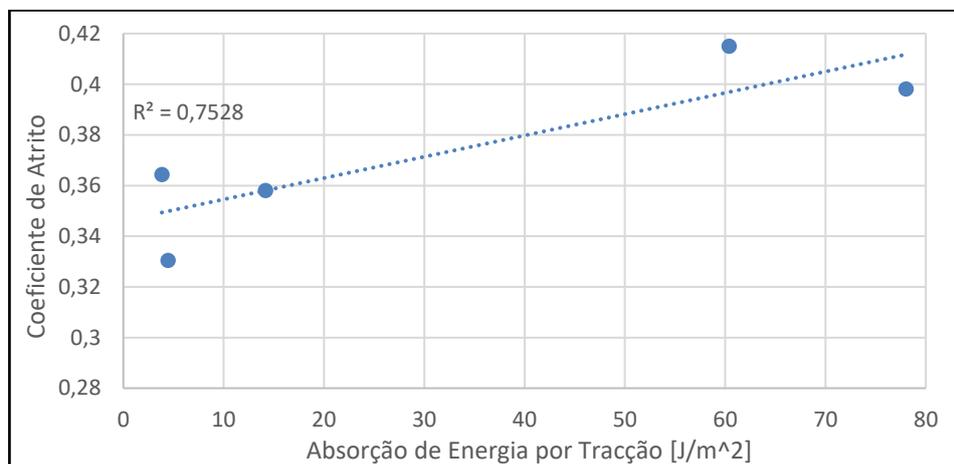


Figura 3.6. Comparação do coeficiente de atrito com a absorção de energia por tracção. A figura mostra uma linha de tendência e respectivo coeficiente de determinação.

3.3. Propriedades Tácteis e Influência do Coeficiente de Atrito

Neste subcapítulo irá ser abordada a influencia do coeficiente de atrito nas várias propriedades tácteis, avaliadas através dos questionários de percepção táctil. De forma a verificar se existe algum grau de correlação entre o atrito e as propriedades tácteis, foi utilizada uma análise de correlação de Spearman (subcapítulo 2.2.4.2.). É importante referir que o coeficiente de atrito comparado neste subcapítulo refere-se a medições na zona da face ventral do antebraço e para amostras com uma humidade relativa de 55%.

Relativamente às propriedades tácteis analisadas, a sensação de temperatura (quente-frio) não irá ser abordada, uma vez que os voluntários não tiveram a percepção táctil necessária para conseguirem distinguir este parâmetro entre os vários papéis. Na Figura 3.7 são apresentados os resultados obtidos através dos questionários de percepção táctil.

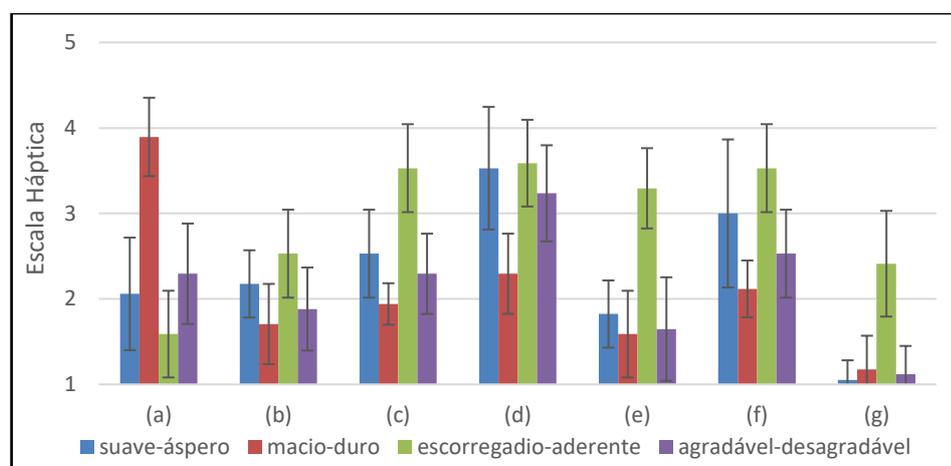


Figura 3.7. Resultados dos testes de percepção táctil. Para perceber a escala utilizada ver subcapítulo 2.2.3. a) Papel de impressão; b) Papel de bar; c) Toalha de papel; d) Guardanapo de papel; e) Papel higiénico; f) Rolo de papel de cozinha; g) Lenço de papel.

A agradabilidade ao toque é a qualidade mais importante no que toca à percepção táctil. Isto porque a escolha de um determinado papel para uso pessoal, além do factor económico e de marketing, ocorre quando ao ser utilizado transmite sensações mais agradáveis ao toque. A qualidade com uma maior correlação com a agradabilidade ao toque foi a qualidade suave-áspero, com uma correlação máxima, fortemente positiva de 1. As restantes qualidades também estão correlacionadas com a agradabilidade ao toque, no

entanto a sua correlação não é tão forte (0,64 para macio-duro e 0,81 para escorregadio-aderente). Isto quer dizer que a sensação de suavidade ou aspereza é um dos principais factores para determinar se um material é ou não é agradável ao toque. Também a sensação de suavidade está correlacionada com a sensação de aderência, sendo que foi obtido um coeficiente de correlação de 0,81, ou seja, normalmente materiais mais ásperos tendem a ser mais aderentes. Isto vem contrariar Skedung *et al.* (2010) [23] uma vez que estes afirmam que a sensação de aspereza está correlacionada negativamente com o coeficiente de atrito. Quanto maior for a área de contacto, ou seja, quanto menos áspero (ou mais suave) for um material, maior será o coeficiente de atrito. Além disso, quanto maior for o coeficiente de atrito, maior será a aderência de uma material. De acordo com a explicação anterior, os resultados obtidos por Skedung *et al.* (2010) [23] aparentemente, são mais correctos.

De facto, a avaliação de propriedades tácteis apresenta algumas dificuldades na sua análise uma vez que é difícil arranjar uma amostra significativa de participantes. Além disso, as qualidades avaliadas têm significados que muitas das vezes são diferentes para cada pessoa. Mesmo com a utilização de papéis de referência tornou-se difícil que as pessoas percebessem, de forma clara o significado de cada qualidade pois, cada papel de referência estava associado a várias qualidades.

É possível visualizar a influência do coeficiente de atrito nas propriedades tácteis, nomeadamente, a suavidade e a agradabilidade ao toque, na Figura 3.8.

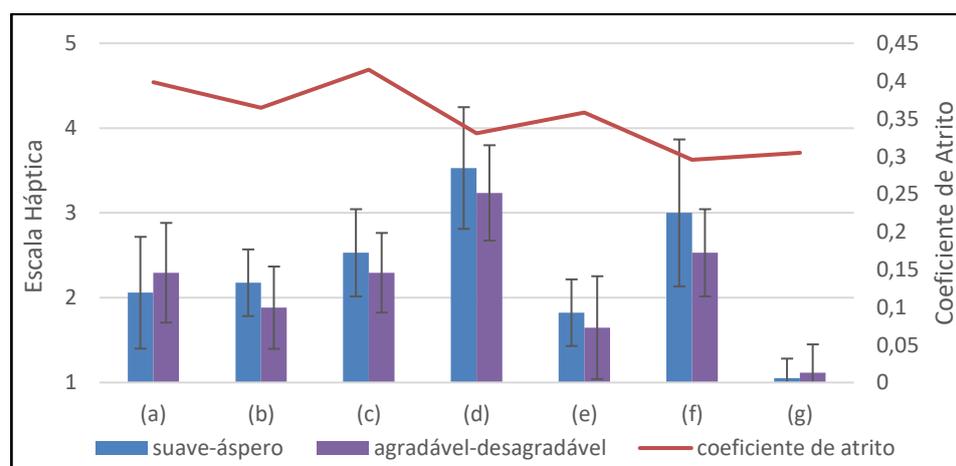
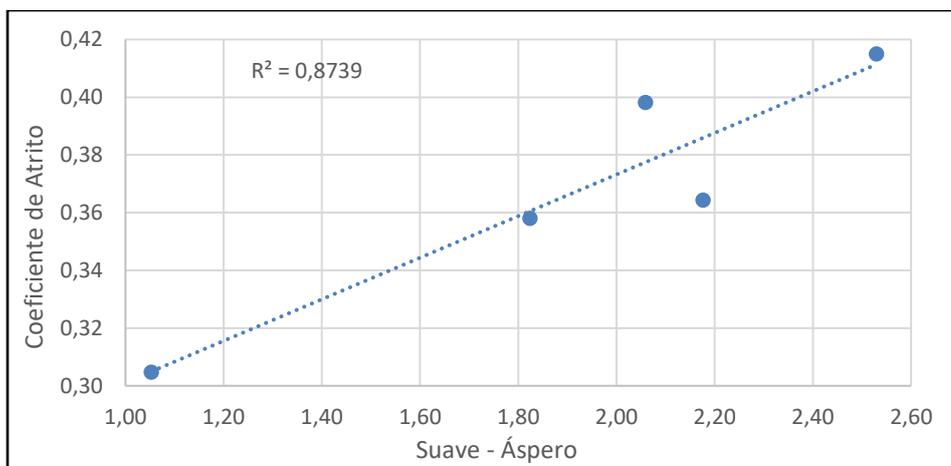


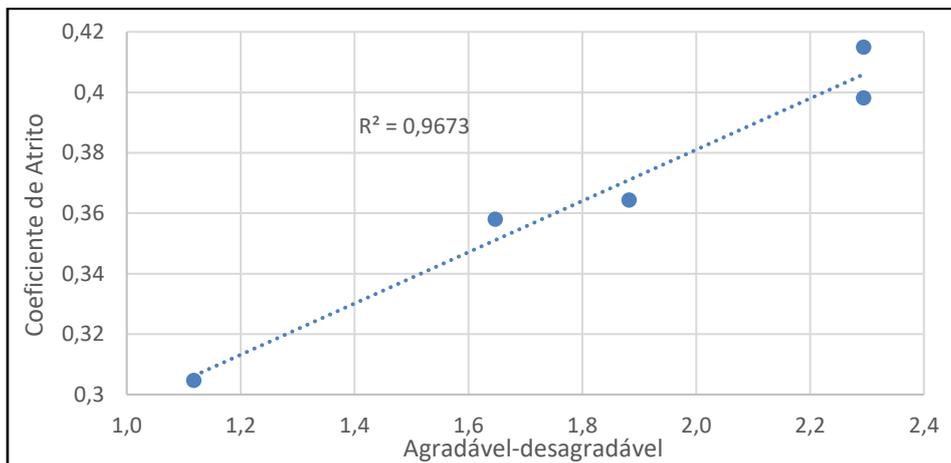
Figura 3.8. Resultados dos testes de percepção táctil relativamente às qualidades suave-áspero e agradável-desagradável, comparativamente aos testes de atrito. Para perceber a escala utilizada ver subcapítulo 2.2.3.

a) Papel de impressão; b) Papel de bar; c) Toalha de papel; d) Guardanapo de papel; e) Papel higiénico; f) Rolo de papel de cozinha; g) Lenço de papel.

Através da análise desta figura, não se consegue observar nenhuma correlação entre as propriedades tácteis e o coeficiente de atrito. Utilizando o coeficiente de correlação ρ de Spearman para determinar se existe alguma correlação, obtêm-se valores de $-0,07$ e de $-0,05$ para a suavidade e para a agradabilidade ao toque, respectivamente, quando comparados com o coeficiente de atrito. Estes resultados indicam que não existe nenhuma correlação. No entanto, se forem ignoradas as amostras (d) e (f) para os cálculos, os resultados tornam-se bastante diferentes, como se pode observar na Figura 3.9.



(a)



(b)

Figura 3.9. Comparação do coeficiente de atrito com: (a) a suavidade; (b) a agradabilidade ao toque. Ambas as figuras mostram uma linha de tendência e respectivo coeficiente de determinação.

Não considerando as amostras (d) e (f), os coeficientes de correlação ρ de Spearman que se obtêm correspondem a 0,90 para a suavidade e 0,97 para a

agradabilidade ao toque, comparativamente ao coeficiente de atrito. Estes resultados indicam que, à partida, materiais com um coeficiente de atrito inferior são mais suaves. Além disso, também são mais agradáveis.

Uma vez que a produção do papel pode variar bastante, tanto nas várias etapas, como nas matérias-primas e produtos químicos utilizados, estes resultados poderão querer dizer que as propriedades tácteis podem comportar-se de formas diferentes para tipos de papel diferentes.

Não foram encontrados coeficientes de correlação significativos para as propriedades de macio-duro e escorregadio-aderente comparativamente ao coeficiente de atrito. Para a qualidade macio-duro foi obtido um coeficiente de correlação de 0,21, enquanto que para a qualidade escorregadio-aderente foi obtido um coeficiente de correlação de $-0,22$.

Relativamente aos resultados dos testes de percepção táctil tendo em conta o género, verifica-se que estes, em geral, são sempre semelhantes. Na Figura 3.10 estão representados os resultados dos testes de percepção táctil separados por género, relativamente à qualidade suave-áspero.

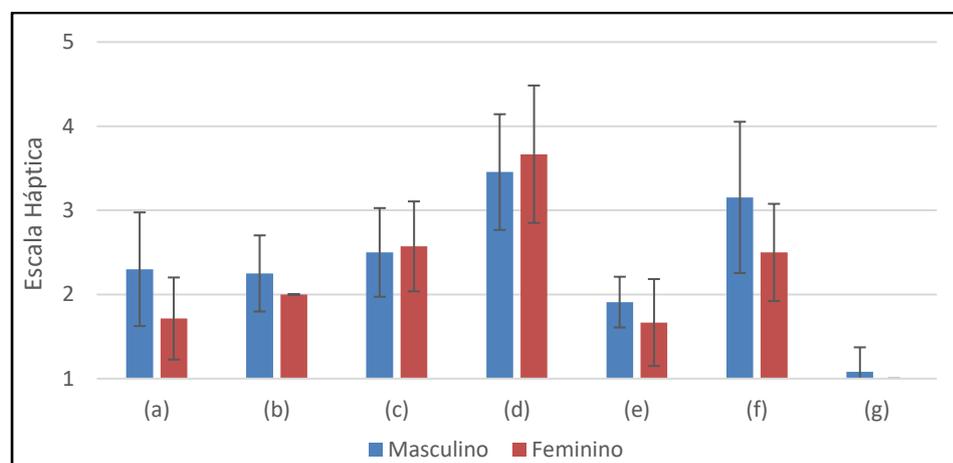


Figura 3.10. Resultados dos testes de percepção táctil separados por género, relativamente à qualidade suave-áspero. Para perceber a escala utilizada ver subcapítulo 2.2.3. a) Papel de impressão; b) Papel de bar; c) Toalha de papel; d) Guardanapo de papel; e) Papel higiénico; f) Rolo de papel de cozinha; g) Lenço de papel.

Através da análise da Figura 3.10 é visível que os resultados são todos bastante semelhantes, independentemente do género. No entanto, em 5 das 7 amostras verifica-se

que para uma certa amostra, as pessoas do sexo masculino tendem a senti-la como mais rugosa ou menos suave em comparação com as pessoas do sexo feminino. Por outro lado, as pessoas do sexo feminino tendem a sentir as amostras como menos rugosas ou mais suaves, comparativamente às pessoas do sexo masculino. Esta diferença corresponde em média a 12%.

Após a apresentação e discussão de resultados, no capítulo seguinte serão apresentadas as conclusões obtidas no âmbito desta dissertação. Posteriormente serão apresentadas propostas de trabalho futuras relacionadas com o tema em estudo.

4. CONCLUSÕES

O atrito entre a pele a deslizar sobre alguns diferentes tipos de papel para uso pessoal foi avaliado. Para isso foi utilizada uma sonda de medição de atrito, portátil. O coeficiente de atrito foi determinado em duas regiões anatómicas, a palma da mão e a face ventral do antebraço. O papel foi testado a três humidades relativas diferentes, 32, 55 e 83%. Também foram realizados ensaios de tracção em que foi possível determinar as seguintes propriedades mecânicas: resistência à tracção, deformação à rotura, rigidez à tracção e absorção de energia à tracção. A espessura e a gramagem também foram aferidas.

As propriedades tácteis do papel foram determinadas com a participação de 29 voluntários (10 pessoas do sexo feminino e 19 pessoas do sexo masculino), que fizeram uma avaliação numa escala háptica de 1 a 5. Foram utilizados papéis de referência para uniformizar a escala. Os voluntários estiveram impedidos de visualizar os materiais que avaliaram. Foi possível retirar as seguintes conclusões:

- Foi demonstrado que o coeficiente de atrito é superior na zona da palma da mão, quando comparado à face ventral do antebraço. Em média o coeficiente de atrito na palma da mão foi 25% superior comparativamente à face ventral do antebraço.
- A palma da mão apresentou apenas um regime, com um coeficiente de atrito constante ao longo da variação da evolução da carga normal, enquanto que, a face ventral do antebraço apresentou um atrito caracterizado por dois regimes.
- Para humidades relativas de 32% e de 83% também se manteve o maior atrito na zona da palma da mão comparativamente à face ventral do antebraço, no entanto, de uma forma menos acentuada. Para uma HR de 32% o atrito aumentou em média 10%, enquanto que para uma HR de 83% o atrito aumentou em média 12%.
- Relativamente à HR no papel, verificam-se poucas alterações no coeficiente de atrito, o que poderá significar que o papel está a desempenhar bem a sua função. Além disso, na maioria dos casos o

coeficiente de atrito a uma HR ambiente, corresponde ao valor máximo ou mínimo das três HR's. Assim sendo, os diferentes tipos de papel poderão estar otimizados de modo a uma HR ambiente, terem as melhores propriedades tribológicas.

- Nos testes realizados na zona da face ventral do antebraço as amostras de papel de impressão (a), de papel de bar (b) e de guardanapo de papel (d) apresentaram um decréscimo do coeficiente de atrito com o aumento do teor de humidade relativa do papel.
- Foi obtido um coeficiente de Spearman fortemente positivo de 0,94 para a comparação entre o coeficiente de atrito e a resistência à tracção. O aumento da resistência à tracção leva a um aumento do coeficiente de atrito.
- Foi obtido um coeficiente de Spearman positivo de 0,60 para a relação entre o coeficiente de atrito e a absorção de energia por tracção, o que leva a crer que para um aumento da absorção de energia por tracção ocorre um aumento do coeficiente de atrito.
- Foi obtido um coeficiente de Spearman fortemente negativo de $-0,90$ para a relação entre o coeficiente de atrito e a rigidez à tracção. Quer isto dizer que com o aumento da rigidez à tracção. O coeficiente de atrito tende a diminuir.
- Foram obtidos coeficientes de Spearman fortemente negativos entre o coeficiente de atrito, e a gramagem e a espessura, no valor de $-0,80$ e de $-0,70$, respectivamente. Aumentando a espessura ou a gramagem, o coeficiente de atrito tende a aumentar. Para se obterem estes valores do coeficiente de Spearman, as amostras de papel de impressão, (a), e de toalha de papel, (c), foram excluídas desta análise.
- Foi analisada a correlação existente entre as qualidades tácteis avaliadas através de uma análise ρ de Spearman. Foi obtido um coeficiente de correlação máximo de 1 entre a agradabilidade ao toque e a qualidade suave-áspero. Também relativamente à agradabilidade ao toque, foram obtidos coeficientes de correlação de 0,64 para a qualidade macio-duro e de 0,81 para a qualidade escorregadio-aderente.

- Foi obtida uma correlação fortemente positiva de 0,81 entre a sensação de suavidade e a sensação de aderência. Isto indica que materiais mais ásperos tendem a ser mais aderentes.
- Para todas as amostras, não foi encontrada uma correlação significativa entre o coeficiente de atrito e as propriedades tácteis. No entanto, excluindo as amostras de guardanapo de papel (d) e de rolo de papel de cozinha (f), obtêm-se correlações fortemente positivas de 0,90 e de 0,97 para a sensação de suavidade e para a agradabilidade ao toque, respectivamente. Estes resultados podem indicar que existem diferentes tipos de papel com comportamentos distintos. Além disso, à excepção das amostras (d) e (f), materiais com um coeficiente de atrito inferior são mais suaves e mais agradáveis.
- O efeito de género não foi muito sentido, ou seja, os resultados entre pessoas do sexo masculino e pessoas do sexo feminino foram semelhantes. No entanto, para a qualidade suave-áspero, foi verificado que as pessoas do sexo masculino, em geral, tendem a sentir amostras mais ásperas ou menos suaves, comparando com pessoas do sexo feminino. Esta diferença correspondeu em média a 12%, de acordo com a escala háptica utilizada.

Como trabalho futuro sugerem-se as seguintes propostas:

- A criação de um tribómetro em que os testes seriam realizados automaticamente e sem intervenção humana. Seria também utilizado um material para substituir a pele de modo a que a influência do ser humano fosse o mais reduzida possível. O utilizador apenas tinha que introduzir o material no tribómetro e seleccionar os parâmetros de ensaio. Desta forma iriam obter-se melhores resultados, ou seja, mais uniformes e com um desvio-padrão menor.
- Um estudo idêntico ao apresentado nesta dissertação, no entanto, onde a rugosidade superficial fosse medida e posteriormente comparada com as propriedades mecânicas, e também com as qualidades tácteis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. M. D. e L. E. C., *Nova Enciclopédia Portuguesa (Volume 10)*, S.A.E.P.A. Clube Internacional do Livro, 1996.
- [2] C. Thiulin, C. Pailler-Mattei, R. Vargiolu, S. Lancelot, e H. Zahouani, «Study of the tactile perception of bathroom tissues: Comparison between the sensory evaluation by a handfeel panel and a tribo-acoustic artificial finger», *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, vol. 150, pp. 417–425, 2017.
- [3] L. Skedung *et al.*, «Tactile perception: Finger friction, surface roughness and perceived coarseness», *Tribol. Int.*, vol. 44, n. 5, pp. 505–512, 2011.
- [4] INETI - Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, *Guia Técnico - Sector do Papel e Cartão*. 2001.
- [5] G. Broughton e J. L. Gregg, «Some observations on the kinetic coefficient of friction of paper», *Tappi J.*, vol. 35(11):489, 1952.
- [6] N. Jones e J. D. Peel, «Frictional properties of paper and their importance in supercalendering», *Pap. Technol.*, vol. 8(1): 43-5, 1967.
- [7] N. Gurnagul, M. D. Ouchi, N. Dunlop-Jones, D. G. Sparkes, e J. T. Wearing, «Factors affecting the coefficient of friction of paper», *J. Appl. Polym. Sci.*, 1992.
- [8] P. Editora, Ed., *Dicionário da Língua Portuguesa*. 2009.
- [9] P. G. Agache e P. Humbert, «Measuring the skin: non-invasive investigations, physiology, normal constants», *1st Ed. Springer - Verlag, Berlin*, vol. Physiology, 2004.
- [10] L. Vilhena e A. Ramalho, «Friction of Human Skin against Different Fabrics for Medical Use», *Lubricants*, 2016.
- [11] J. Navarro, *Manual de Apoio ao Estudante - Fisiologia*, QuidNovi. 2006.
- [12] E. Fernandes, «Estudo das condições de contacto com atrito envolvendo a pele humana», Universidade de Coimbra, 2010.
- [13] S. Derler e L.-C. Gerhardt, «Tribology of Skin: Review and Analysis of Experimental Results for the Friction Coefficient of Human Skin», *Tribol. Lett.*, vol. 45, n. 1, pp. 1–27, 2012.
- [14] Z. R. Zhou e Z. M. Jin, «Biotribology: Recent progresses and future perspectives», *Biosurface and Biotribology*, vol. 1, n. 1, pp. 3–24, 2015.
- [15] J. Navarro, *Manual de Apoio ao Estudante - Anatomia*, QuidNovi. 2006.
- [16] C. J. Barnes, T. H. C. Childs, B. Henson, e C. H. Southee, «Surface finish and touch—a case study in a new human factors tribology», *Wear*, vol. 257, n. 7, pp. 740–750, 2004.
- [17] E. Van Der Heide, X. Zeng, e M. A. Masen, «Skin tribology: Science friction?»,

- Friction*, vol. 1, n. 2, pp. 130–142, 2013.
- [18] S. A. Johnson, D. M. Gorman, M. J. Adams, e B. J. Briscoe, «The friction and lubrication of human stratum corneum.», 1993, pp. 663–672.
- [19] D. Dowson, «Tribology and the skin surface», *Bioeng. Ski. Ski. Surf. Imaging Anal.*, p. pp 159-179, 1997.
- [20] M. J. Adams, B. J. Briscoe, e S. A. Johnson, «Friction and lubrication of human skin», *Tribol. Lett.*, vol. 26, 239–25, 2007.
- [21] C. Pailler-Mattei, S. Nicoli, F. Pirot, R. Vargiolu, e H. Zahouani, «A new approach to describe the skin surface physical properties in vivo», *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, vol. 68, n. 2, pp. 200–206, 2009.
- [22] M. G. Gee, P. Tomlins, A. Calver, R. H. Darling, e M. Rides, «A new friction measurement system for the frictional component of touch», *Wear*, vol. 259, n. 7–12, pp. 1437–1442, 2005.
- [23] L. Skedung *et al.*, «Finger friction measurements on coated and uncoated printing papers», *Tribol. Lett.*, vol. 37, n. 2, pp. 389–399, 2010.
- [24] S. E. Tomlinson, R. Lewis, X. Liu, C. Texier, e M. J. Carré, «Understanding the friction mechanisms between the human finger and flat contacting surfaces in moist conditions», *Tribol. Lett.*, vol. 41(1), pp. 283–294, 2011.
- [25] A. Ramalho, C. L. Silva, A. A. C. C. Pais, e U. S. Sousa, «In vivo friction study of human palmoplantar skin against glass», *Tribologia*, vol. 25, n. 3, pp. 14–23, 2006.
- [26] A. Ramalho, C. L. Silva, A. A. C. C. Pais, e J. J. S. Sousa, «In vivo friction study of human skin: Influence of moisturizers on different anatomical sites», *Wear*, vol. 263, n. 7–12, pp. 1044–1049, Set. 2007.
- [27] A. Ramalho, «Influence of Environmental Humidity on the Friction of Human Skin Against Textiles», em *17th International Conference on Wear of Materials*.
- [28] M. Klaassen, D. J. Schipper, e M. A. Masen, «Influence of the relative humidity and the temperature on the in-vivo friction behaviour of human skin», *Biotribology*, vol. 6, pp. 21–28, Jun. 2016.
- [29] X. Chen, F. Shao, C. Barnes, T. Childs, e B. Henson, «Exploring relationships between touch perception and surface physical properties», *Int. J. Des.*, vol. 3, n. 2, pp. 67–76, 2009.
- [30] A. Ramalho, P. Szekeres, e E. Fernandes, «Friction and tactile perception of textile fabrics», *Tribol. Int.*, vol. 63, pp. 29–33, 2013.
- [31] A. F. El-Shimi, «In vivo skin friction measurements», *J. Soc. Cosmet. Chem.*, vol. 51, n. February, pp. 37–51, 1977.
- [32] R. K. Sivamani, G. C. Wu, N. V. Gitis, e H. I. Maibach, «Ethnicity on the Volar Forearm», pp. 299–305, 2003.
- [33] A. B. Cua, K.-P. Wilhelm, e H. i. Maibach, «Frictional properties of human skin: relation to age, sex and anatomical region, stratum corneum hydration and transepidermal water loss», *Br. J. Dermatol.*, vol. 123, n. 4, pp. 473–479, 1990.

- [34] C. Fellers, M. Backstrom, M. Htun, e G. Lindholm, «Paper-to-paper friction - Paper structure and moisture», *Nord. Pulp Pap. Res. J.*, 1998.
- [35] W. Tang, S. rong Ge, H. Zhu, X. chuan Cao, e N. Li, «The Influence of Normal Load and Sliding Speed on Frictional Properties of Skin», *J. Bionic Eng.*, vol. 5, n. 1, pp. 33–38, 2008.
- [36] M. Zhang e A. F. . Mak, «In vivo friction properties of human skin.», *Prosthet. Orthot. Int.*, vol. 23, n. 2, pp. 135–141, 1999.
- [37] R. K. Sivamani, J. Goodman, N. V. Gitis, e H. I. Maibach, «Coefficient of friction: tribological studies in man - an overview», *Ski. Res. Technol.*, vol. 9, n. 3, pp. 227–234, 2003.
- [38] E. F. de M. Fernandes, «Estudo das condições de contacto com atrito envolvendo a pele humana», Universidade de Coimbra, 2010.

ANEXO A

Foram realizados ensaios de tracção a duas velocidades distintas: $7,1 \text{ mm/min}$ e $25,4 \text{ mm/min}$. Assim sendo, foi possível fazer uma comparação entre estes dois conjuntos de ensaios, e, deste modo, foi avaliada a influencia da velocidade nas propriedades mecânicas determinadas. Nas figuras que irão ser apresentadas de seguida, algumas não apresentam os resultados da amostra de papel de impressão, (a), pois impediria de distinguir as restantes amostras dada a diferença de valores obtidos.

Na Figura A.1 está ilustrada a comparação entre as velocidades de ensaio e a resistência à tracção.

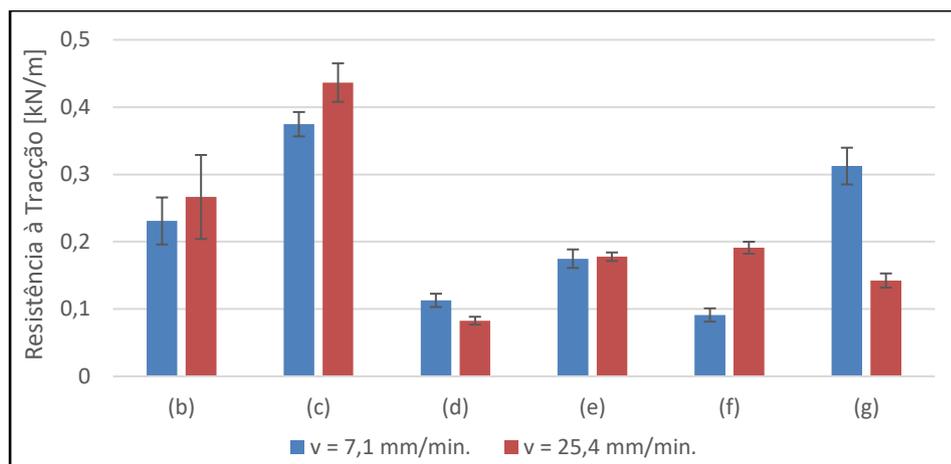


Figura A.1. Influência da velocidade de ensaio na resistência à tracção. b) Papel de bar; c) Toalha de papel; d) Guardanapo de papel; e) Papel higiénico; f) Rolo de papel de cozinha; g) Lenço de papel.

Relativamente ao papel de impressão (a), para a velocidade de $7,1 \text{ mm/min}$ a resistência à tracção foi de $1,95 \pm 0,08 \text{ kN/m}$, enquanto que para a velocidade de $25,4 \text{ mm/min}$, a resistência à tracção correspondeu a $4,52 \pm 3,02 \text{ kN/m}$. Através da análise dos resultados, foi possível concluir que a resistência à tracção, foi em média 27% superior para uma velocidade de $25,4 \text{ mm/min}$, comparativamente à velocidade de $7,1 \text{ mm/min}$.

Na Figura A.2 está representada a deformação à rotura obtida para as diferentes velocidades de ensaio.

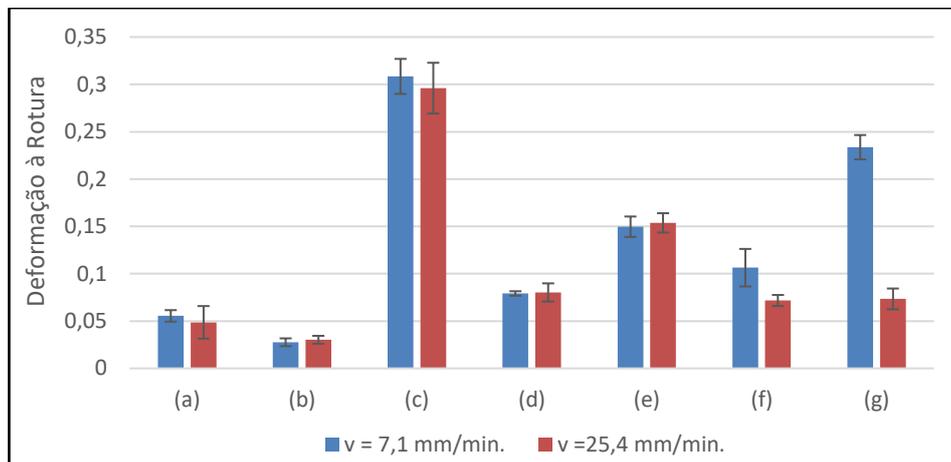


Figura A.2. Influência da velocidade de ensaio na deformação à rotura. a) Papel de impressão; b) Papel de bar; c) Toalha de papel; d) Guardanapo de papel; e) Papel higiénico; f) Rolo de papel de cozinha; g) Lenço de papel.

Através da análise dos resultados, foi possível concluir que a deformação à rotura foi, em média, 15% superior para uma velocidade de 7,1 mm/min, comparativamente à velocidade de 25,4 mm/min.

Relativamente à absorção de energia por tracção, está ilustrado na Figura A.3 o seu resultado para as diferentes velocidades operadas e, de acordo com cada amostra.

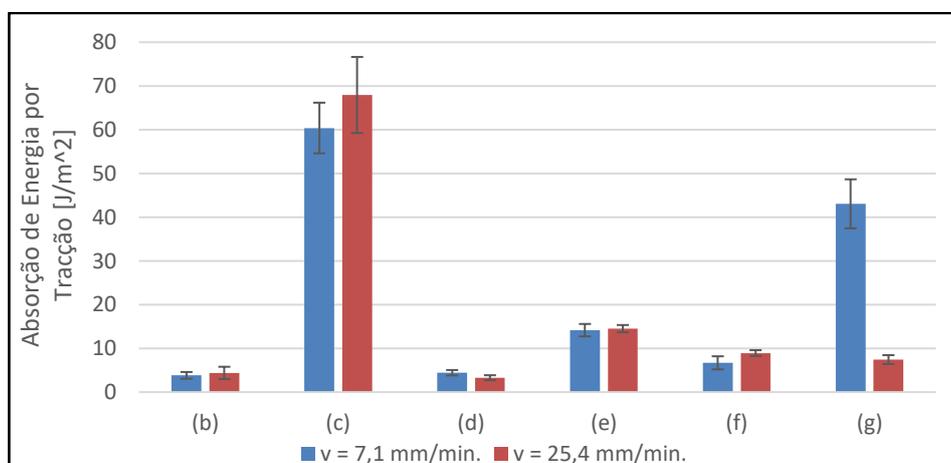


Figura A.3. Influência da velocidade de ensaio na absorção de energia à tracção. b) Papel de bar; c) Toalha de papel; d) Guardanapo de papel; e) Papel higiénico; f) Rolo de papel de cozinha; g) Lenço de papel.

Para a amostra de papel de impressão, (a), a uma velocidade de $7,1 \text{ mm/min}$ a absorção de energia à tracção foi de $78,01 \pm 11,35 \text{ J/m}^2$, enquanto que, para uma velocidade de $25,4 \text{ mm/min}$, a absorção de energia à tracção correspondeu a $122,67 \pm 27,78 \text{ J/m}^2$.

Foi verificado que, relativamente à absorção de energia à tracção, os resultados variaram de forma pouco significativa. Para a velocidade de $25,4 \text{ mm/min}$, o valor da absorção de energia à tracção foi em média 1,4% superior, comparativamente à velocidade de $7,1 \text{ mm/min}$.

Por último, também a rigidez à tracção foi analisada, relativamente ao efeito da velocidade dos ensaios de tracção (Figura A.4).

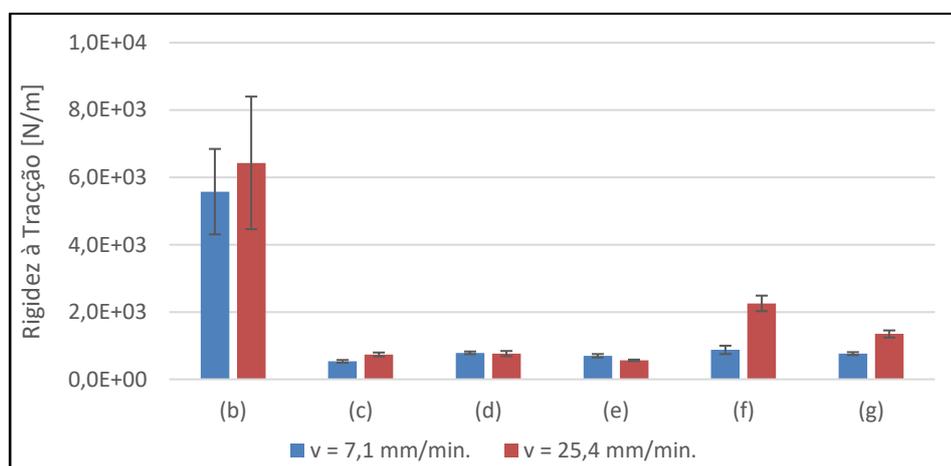


Figura A.4. Influência da velocidade de ensaio na rigidez à tracção. b) Papel de bar; c) Toalha de papel; d) Guardanapo de papel; e) Papel higiénico; f) Rolo de papel de cozinha; g) Lenço de papel.

Relativamente ao papel de impressão (a), para a velocidade de $7,1 \text{ mm/min}$ a rigidez à tracção foi de $60,56 \pm 4,08 \text{ kN/m}$, enquanto que para a velocidade de $25,4 \text{ mm/min}$, a rigidez à tracção correspondeu a $151,49 \pm 95,56 \text{ kN/m}$.

Através dos resultados obtidos foi possível concluir que, para uma velocidade de $25,4 \text{ mm/min}$, a rigidez à tracção apresenta valores 59% mais elevados, comparativamente aos valores obtidos para uma velocidade de $7,1 \text{ mm/min}$.

As principais conclusões retiradas acerca da influência da variação da velocidade de ensaio nas propriedades mecânicas obtidas foram as seguintes:

- A resistência à tração, foi em média 27% superior para uma velocidade de 25,4 *mm/min*, comparativamente à velocidade de 7,1 *mm/min*.
- A deformação à rotura foi, em média, 15% superior para uma velocidade de 7,1 *mm/min*, comparativamente à velocidade de 25,4 *mm/min*.
- Os resultados variaram de forma pouco significativa. Para a velocidade de 25,4 *mm/min*, o valor da absorção de energia à tração foi em média 1,4% superior, comparativamente à velocidade de 7,1 *mm/min*.
- Para uma velocidade de 25,4 *mm/min*, a rigidez à tração apresenta valores 59% mais elevados, comparativamente aos valores obtidos para uma velocidade de 7,1 *mm/min*.

ANEXO B

· U  C ·

Questionário sobre os hábitos pessoais

Teste N° ____

Por favor preencha o seguinte questionário de forma a ajudar-nos no nosso trabalho de avaliação das características da pele.

1. O seu sexo:
 - Masculino
 - Feminino

2. A sua idade:
 - 20 a 29
 - 30 a 39
 - 40 a 49
 - 50 a 59
 - Outra: _____

3. A sua etnia:
 - Caucasiana (branca)
 - Negra (de origem Africana)
 - Asiática
 - Outra: _____

4. A cor natural do seu cabelo:
 - Castanho Claro
 - Castanho Escuro
 - Preto
 - Loiro
 - Ruivo

5. Normalmente com que frequência toma duche e/ou banho?

Duche

- Duas ou mais vezes por dia
- Uma vez por dia
- De dois em dois dias
- Menos que a anterior

Banho

- Duas ou mais vezes por dia
- Uma vez por dia
- De dois em dois dias
- Menos que a anterior

6. Usa produto(s) de tratamento para a pele?

- Sim
- Não

7. Se sim, identifique-o(s), e diga em que parte do corpo usa cada produto (ex: "mãos - Nivea"):

_____	_____
_____	_____
_____	_____

8. Que quantidade de água bebe normalmente em média por dia?

- <0,5l
- 0,5l a 1l
- 1l a 2l
- 2l a 3l
- >3l

9. Por favor, classifique os seguintes alimentos tendo em conta os seus consumos normais, seleccionando com uma cruz a opção que considerar mais adequada, desde “nunca consumo” até “consumo frequentemente”:

	Nunca	Raramente	Ocasionalmente	Frequentemente
Peixe				
Carnes Brancas				
Carnes Vermelhas				
Arroz				
Batatas				
Vegetais				
Frutas				
Pão, bolos, biscoitos				
Chocolate				
Nozes				

10. Consome bebidas alcoólicas?

- Sim
- Não

11. Se sim, indique a quantidade de álcool, em média, ingere semanalmente:

- Cerveja: ____l
- Vinho: ____l
- Licor: ____l
- Bebidas brancas: ____l
- Outra: _____; ____l

12. Fuma?

- Sim
- Não

13. Se sim, indique quantos cigarros, em média, fuma por dia?

- <5
- 5 a 10
- 11 a 20
- 21 a 30
- >31 a 40
- >40

14. Diga, aproximadamente, quanto tempo costuma estar em exposição directa ao sol?

- Nunca
- Raramente
- Ocasionalmente
- Frequentemente

15. Esteve exposto ao sol mais de 1h nas últimas 24h?

- Sim
- Não

16. Por favor, indique se acha que existe algum factor que pode ter influência nas propriedades da sua pele (doença de pele, tratamentos cosméticos, queimaduras solares ou outras, etc...):



Questionário sobre percepção táctil

Teste N° ____

Dados da pessoa:

- Idade: ____
- Sexo (M/F): ____

Condições do ensaio:

- Hora/dia do teste: ____h ____min. / ____/07/2017
- Temperatura ambiente: ____ °C
- Humidade relativa ambiente: ____%

Análise Sensorial:

Nota: 1) muito; 2) um pouco; 3) neutro; 4) um pouco; 5) muito.

Material 1:

1. Suave ou áspero?

Suave	1	2	3	4	5
-------	---	---	---	---	---

Áspero

2. Macio ou duro?

Macio	1	2	3	4	5
-------	---	---	---	---	---

Duro

3. Escorregadio ou aderente?

Escorregadio	1	2	3	4	5
--------------	---	---	---	---	---

Aderente

4. Qual a sensação de temperatura?

Quente	1	2	3	4	5
--------	---	---	---	---	---

Frio

5. Agradável ao toque?

Agradável	1	2	3	4	5
-----------	---	---	---	---	---

Desagradável

Material 2:

1. Suave ou áspero?

Suave	1	2	3	4	5
-------	---	---	---	---	---

Áspero

2. Macio ou duro?

Macio	1	2	3	4	5
-------	---	---	---	---	---

Duro

3. Escorregadio ou aderente?

Escorregadio	1	2	3	4	5
--------------	---	---	---	---	---

Aderente

4. Qual a sensação de temperatura?

Quente	1	2	3	4	5
--------	---	---	---	---	---

Frio

5. Agradável ao toque?

Agradável	1	2	3	4	5
-----------	---	---	---	---	---

Desagradável

Material 3:

1. Suave ou áspero?

Suave	1	2	3	4	5
-------	---	---	---	---	---

Áspero

2. Macio ou duro?

Macio	1	2	3	4	5
-------	---	---	---	---	---

Duro

3. Escorregadio ou aderente?

Escorregadio	1	2	3	4	5
--------------	---	---	---	---	---

Aderente

4. Qual a sensação de temperatura?

Quente	1	2	3	4	5
--------	---	---	---	---	---

Frio

5. Agradável ao toque?

Agradável	1	2	3	4	5
-----------	---	---	---	---	---

Desagradável

Material 4:

1. Suave ou áspero?

Suave	1	2	3	4	5
-------	---	---	---	---	---

Áspero

2. Macio ou duro?

Macio	1	2	3	4	5
-------	---	---	---	---	---

Duro

3. Escorregadio ou aderente?

Escorregadio	1	2	3	4	5
--------------	---	---	---	---	---

Aderente

4. Qual a sensação de temperatura?

Quente	1	2	3	4	5
--------	---	---	---	---	---

Frio

5. Agradável ao toque?

Agradável	1	2	3	4	5
-----------	---	---	---	---	---

Desagradável

Material 5:

1. Suave ou áspero?

Suave	1	2	3	4	5
-------	---	---	---	---	---

Áspero

2. Macio ou duro?

Macio	1	2	3	4	5
-------	---	---	---	---	---

Duro

3. Escorregadio ou aderente?

Escorregadio	1	2	3	4	5
--------------	---	---	---	---	---

Aderente

4. Qual a sensação de temperatura?

Quente	1	2	3	4	5
--------	---	---	---	---	---

Frio

5. Agradável ao toque?

Agradável	1	2	3	4	5
-----------	---	---	---	---	---

Desagradável

Material 6:

1. Suave ou áspero?

Suave	1	2	3	4	5
-------	---	---	---	---	---

Áspero

2. Macio ou duro?

Macio	1	2	3	4	5
-------	---	---	---	---	---

Duro

3. Escorregadio ou aderente?

Escorregadio	1	2	3	4	5
--------------	---	---	---	---	---

Aderente

4. Qual a sensação de temperatura?

Quente	1	2	3	4	5
--------	---	---	---	---	---

Frio

5. Agradável ao toque?

Agradável	1	2	3	4	5
-----------	---	---	---	---	---

Desagradável

Material 7:

1. Suave ou áspero?

Suave	1	2	3	4	5
-------	---	---	---	---	---

Áspero

2. Macio ou duro?

Macio	1	2	3	4	5
-------	---	---	---	---	---

Duro

3. Escorregadio ou aderente?

Escorregadio	1	2	3	4	5
--------------	---	---	---	---	---

Aderente

4. Qual a sensação de temperatura?

Quente	1	2	3	4	5
--------	---	---	---	---	---

Frio

5. Agradável ao toque?

Agradável	1	2	3	4	5
-----------	---	---	---	---	---

Desagradável