



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE

Corso di Laurea in Scienze e Tecnologie Alimentari

***PERCEZIONE SENSORIALE
DEL COMPORTAMENTO REOLOGICO
DEGLI ALIMENTI***

SENSORY PERCEPTION OF RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF FOODS

TIPO TESI: Compilativa

Studente:
Valentina Ricci

Relatore:
Prof. Pasquale Massimiliano Falcone

ANNO ACCADEMICO 2019-2020

ELENCO DELLE TABELLE.....	4
ELENCO DELLE FIGURE	5
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI	7
TEXTURE DEGLI ALIMENTI DEFINIZIONI E TERMINOLOGIA	8
ANALISI SENSORIALE DELLA TEXTURE	13
2.1 Valutazione non orale della texture	14
2.1.1 Analisi visiva	14
2.1.2 Analisi tattile.....	14
2.2 Valutazione orale della texture	20
2.2.1 Processo orale	20
2.2.2 Reciprocità tra processo orale e percezione della texture	34
2.2.3 Ruolo delle proprietà di frattura degli alimenti solidi.....	41
2.2.4 Ruolo delle proprietà reologiche - alimenti semi-solidi e liquidi	46
2.2.5 Ruolo delle proprietà di frizione degli alimenti liquidi e bolo.....	60
2.3 Psicoreologia - Soglie assolute e Soglie Differenziali	64
2.3.1 Legge di Weber.....	65
2.3.2 Legge di Weber-Fechner.....	65
2.3.3 Metodo dei limiti	67
2.3.4 Metodo degli aggiustamenti.....	68
2.3.5 Metodo degli stimoli costanti.....	68
2.4 Alcuni metodi di valutazione sensoriale	71
2.4.1 Alcuni metodi di valutazione sensoriale della texture	72
ANALISI STRUMENTALE DELLA TEXTURE.....	74
3.1 Successi e limiti dell'approccio meccanico distruttivo	74
3.2 Successi e limitazioni dell'approccio reologico	78
CASO STUDIO #1 SOLUZIONI MODELLO	90
CASO STUDIO #2 CREMA DI CAFFÈ	97
CASO STUDIO #3 ALIMENTI PER PAZIENTI DISFAGICI	104
ACETO BALSAMICO TRADIZIONALE	113
CONCLUSIONI	115
BIBLIOGRAFIA	117

RINGRAZIAMENTI 125

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1 Definizione dei Parametri della Texture misurabili sensorialmente	10
Tabella 2 Definizione dei Parametri della Texture misurabili strumentalmente	10
Tabella 3 <i>Attributi della texture percepiti durante il processo orale.</i>	11
Tabella 4 Riepilogo dei risultati dei modelli incrociati della percezione visiva e aptica	16
Tabella 5 Riepilogo dei risultati dei modelli incrociati della percezione uditiva e aptica	17
Tabella 6 Riepilogo dei risultati dei modelli incrociati della percezione olfattiva e aptica	18
Tabella 7 Riepilogo dei risultati dei modelli incrociati della percezione gustativa e aptica	19
Tabella 8 Forza mordente esercitata da soggetti di diversa nazionalità e sesso	23
Tabella 9 Alcuni dati cinematici sul transito del bolo	36
Tabella 10 Velocità di transito del bolo e relativa stima gradienti di velocità	37
Tabella 11 Proprietà della texture percepite dai meccanorecettori	37
Tabella 12 Corrispondenza fisica e sensoriale tra proprietà reologiche e attributi della texture	47
Tabella 13: Metodi strumentali adottati nella caratterizzazione del bolo	59
Tabella 14 Profili di texture basati su meccanismi di reologia e sensazione tribologia	61
Tabella 15 Descrittori originali della texture	76
Tabella 16 Definizione degli attributi sensoriali della texture e dei prodotti di riferimento	100
Tabella 17 Livelli di viscosità e frizione materiali dei campioni di ice coffee	101
Tabella 18 Riepilogo dei parametri reologici e delle proporzioni dei campioni delle gocce	109

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1 Meccanismi di sensazione aptica.....	15
Figura 2 : Processo orale: modello di Hatchings e Lilliford	26
Figura 3 Scala dei livelli di struttura (dal molecolare al macroscopico).....	27
Figura 4 Percezione della texture durante il processo orale.....	28
Figura 5 Processo orale a due stadi: modello di Hiiamae e Pamer (1999).....	31
Figura 6 Movimenti della mandibola nelle tre dimensioni	31
Figura 7 Processo orale: modello di Lucas et al. (2002).....	32
Figura 8 Meccanorecettori e loro distribuzione all'interno della cavità orale.....	35
Figura 9 Movimenti della mandibola al primo morso e durante la masticazione	41
Figura 10 Forza mordente (biting) in diversi alimenti modello: (a) elastico, (b) plastico, (c e d) friabile.....	42
Figura 11 Relazione tra durezza percepita e proprietà di frattura misurata strumentalmente	45
Figura 12: Relazione tra forza di compressione e numero di cicli masticatori	49
Figura 13 Meccanismi dominanti nel processo orale (Witt T., and Stokes 2015)	51
Figura 14 Difficoltà sensoriale nella deglutizione e viscosità stazionaria di boli modello, misurata a diversi gradienti di velocità di scorrimento.....	55
Figura 15 Relazione tra forza massima, lavoro speso per deformare il bolo, difficoltà nella deglutizione percepita sensorialmente e tempo di residenza orale.....	56
Figura 16 Transizione tra proprietà reologiche e tribologiche	62
Figura 17 texture dell'alimento percepita durante a masticazione.....	63
Figura 18 La forma della funzione psicofisica quando la costante di Weber = 0.5.	67
Figura 19 Funzione psicometrica	69
Figura 20 Funzioni psicofisiche (funzioni potenza) secondo Stevens.	70
Figura 21 Curva della TPA	75
Figura 22: Modulo conservativo vs frequenza di sollecitazione di diversi fluidi	80
Figura 23 Tre regimi del coefficiente d'attrito.....	87
Figura 24 Test di realtà aumentata sulla percezione visiva della consistenza.....	92
Figura 25Scale utilizzate durante la valutazione sensoriale.....	94
Figura 26 Contributo relativo della viscosità e frizione materiale sulla percezione sensoriale delle proprietà della texture	102

Figura 27 Analisi di ordinamento dell'intensità percepita sensorialmente degli attributi della texture (cremosità, viscosità e scivolamento) nell'esperienza aptiche e orale	103
Figura 28 Tipico comportamento estensionale di un fluido viscoelastico. Bassa viscosità estensionale consente allungamenti più lenti e più estesi prima dell'interruzione di continuità (formazione di gocce, indipendenti, gocciolamento). Alta viscosità estensionale consente un allungamento meno esteso e la formazione più rapida di gocce indipendenti.....	106
Figura 29 Analizzatore meccanico accoppiato all'estrusione del fluido dalla siringa. Il sistema consente di standardizzare la pressione e la velocità esercitata e la misura dei tempi di sgocciolamento	107
Figura 30 Comportamento durante il flusso dei vari campioni.....	108
Figura 31 Correlazione tra la velocità di scorrimento Misurata alla velocità 50 s ⁻¹ e la percezione della coesività.....	110
Figura 32 Correlazione tra il modulo elastico a 50 rad/s e la coesività percepita.....	110
Figura 33 Correlazione tra viscosità Misurata alla massima estensione e la coesività percepita	111
Figura 34 Correlazione tra tempo di rottura del filamento e la percezione della coesività.....	111
Figura 35 Correlazione tra l'aspetto delle gocce e la massima estensione della viscosità percepita	112
Figura 36 Correlazione tra l'aspetto delle gocce e la percezione della coesività.....	112
Figura 37 Relazione logaritmica tra viscosità percepita sensorialmente e viscosità dinamica misurata strumentalmente	114

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

La texture degli alimenti è legata a numerose proprietà di struttura e alla loro valutazione sensoriale. Gioca un ruolo importante ai fini della progettazione e valutazione della qualità commerciale degli alimenti, in quanto rappresenta uno degli aspetti chiave che determina l'accettabilità e la preferenza del consumatore. È un concetto affascinante e oggetto di interesse crescente negli ultimi anni sia in ambito scientifico che industriale. Tuttavia, le definizioni fin ora disponibili sono ancora lontane da essere esaustive e la terminologia impiegata a livello internazionale per rappresentarne le sue caratteristiche non è ancora unificata e condivisa. La difficoltà di una visione univoca e coerente della texture degli alimenti è legata essenzialmente alla soggettività della valutazione sensoriale delle proprietà di struttura e alla scarsità di metodologie strumentali in grado di determinare proprietà materiali correlate, soprattutto nel caso degli alimenti liquidi.

Questa tesi ha lo scopo di presentare e discutere lo stato dell'arte incentrato sul tema della texture degli alimenti sotto la duplice prospettiva della valutazione sensoriale e strumentale. In particolare, si focalizza sui lavori scientifici più significativi nella prospettiva di chiarire le complesse relazioni tra gli stimoli di natura reologica generati dagli alimenti in condizioni di sollecitazioni controllate e la corrispondente percezione sensoriale.

TEXTURE DEGLI ALIMENTI

DEFINIZIONI E TERMINOLOGIA

La struttura di un alimento è l'espressione dell'interazione tra i suoi costituenti, espressa attraverso legami covalenti e legami deboli su ampia scala dimensionale (sub-atomica – macroscopica). La struttura si origina per effetto dei fenomeni di trasporto (energia e massa) che si instaurano durante il processo produttivo e lungo il periodo di conservazione. La composizione chimica delle materie prime insieme alle modalità operative messe in atto per modulare le variabili tecnologiche delle singole operazioni unitarie sono essenziali nella realizzazione della struttura finale. Le interazioni sono in uno stato termodinamicamente instabile e quindi destinate ad evolvere nel tempo, con la conseguenza che la struttura degli alimenti è destinata a cambiare anche durante l'intero periodo di conservazione previsto prima del consumo. D'altra parte, il consumo stesso dell'alimento implica l'implementazione di una cascata di meccanismi distruttivi durante il processo orale finalizzato alla preparazione del bolo.

In generale, le proprietà fisiche che descrivono la struttura di un materiale possono essere individuate scegliendo la scala dimensionale di maggiore interesse per le finalità previste in ambito scientifico o industriale. Da questa scelta dipende il metodo per la loro determinazione.

La scala dimensionale di maggiore interesse per caratterizzare la struttura di un alimento è molto ampia e include le interazioni che si instaurano da scala microscopica a macroscopica. Le reazioni chimiche e i fenomeni di trasporto di massa e di energia che si instaurano durante la produzione e conservazione degli alimenti avvengono su scala prevalentemente sub microscopica. D'altra parte, la qualità commerciale e la preferenza del consumatore si basa sulla valutazione sensoriale della texture, e quindi sulla percezione simultanea di numerose proprietà legate alla struttura che si estende al di sopra di 100 μm .

Secondo la Norma ISO 5492 (International Organization for Standardization, 1992) la texture è definita come “*L'insieme delle caratteristiche, reologiche, geometriche e di superficie di un alimentare percepibile sensorialmente in modo empirico (ad esempio attraverso prove meccaniche manuali, valutazioni tattili, visive, uditive, gustative)*”. Tale

normativa tecnica codifica anche la terminologia che descrive la percezione di diversi attributi della texture di alimenti solidi, semi-solidi, semi-liquidi e liquidi

La texture può essere caratterizzata sia con analisi soggettive, dunque tecniche di analisi sensoriale, sia con analisi oggettive, accoppiando tecniche di microscopia (acquisizioni delle immagini digitali della struttura superficiale o interna), tecniche di image analysis (analisi numerica delle immagini digitali) e tecniche reologiche (previa correlazione con i risultati dell'analisi sensoriale).

L'essere umano ha da sempre sperimentato la percezione della consistenza tramandandola di generazione in generazione.

Il primo a spiegare il principio della deformazione elastica dei solidi fu lo scienziato Robert Hooke (da cui prendono il nome i solidi Hookean), mentre fu Isaac Newton a gettare le basi sugli studi della texture dei fluidi trovando la legge che governava il flusso di liquidi semplici (fluidi newtoniani).

La consistenza del cibo come argomento principale di studio comparve alle fine degli anni '50 (Szczesniak, 2002), dove fu chiaro che essa comprendeva tutte le caratteristiche fisiche degli alimenti sperimentate dall'uomo e che quindi solo gli esseri umani possono percepire e descrivere tali caratteristiche (Szczesniak, 2002). Alina S. Szczesniak e Malcolm C. Bourne, sono stati grandi pionieri degli studi sulla consistenza degli alimenti rispettivamente dal punto di vista della valutazione sensoriale e delle proprietà fisiche. Gli autori hanno definito alcuni descrittori sensoriali legati all'esperienza percepita durante i primi due cicli di masticazione nel cavo orale (Tabella 1 e 2). I descrittori originali sono riportati di seguito. Successivamente hanno messo a punto un metodo strumentale in grado di determinare alcune proprietà meccaniche che possono essere messe in relazione diretta all'esperienza sensoriale masticatoria. Il metodo strumentale è noto come TPA "Texture Profile Analysis", e consiste nell'eseguire due cicli di compressione a velocità costante e con un grado di compressione prestabilito la matrice esaminata.

Tabella 1 Definizione dei Parametri della Texture misurabili sensorialmente

S. no	Parameter	Defination
1	Hardness	As the force between tongue and palate for compression of a food sample.
2	Viscosity	As the force which is required to draw liquid from a spoon over the tongue. On the nature of food, it can be varying from thin to viscous.
3	Adhesiveness	As the force required for removing the adhesive food material adhere to the mouth.
4	Cohesiveness	As the extent up to which food sample compressed between the teeth before it ruptures.
5	Springiness	As a level up to which food get back in to its original shape.
6	Gumminess	As denseness of the food product which remains exist throughout the process of chewing.
7	Brittleness	As the force with which food get cracks.
8	Chewiness	As the time required for the chewing of food under the effect of constant force.

Tabella 2 Definizione dei Parametri della Texture misurabili strumentalmente

S.no	Parameer	Defination
1	Hardness	As the force required for breaking of food sample into many small pieces by molar teeth during first bite which can vary from soft, firm to hard.
2	Adhesiveness	As the force which is required to reduce the adherence between the food material and the surface with which it is in contact. On the basis of adhesiveness food can be sticky or tacky gooey.
3	Cohesiveness	As the limit to which a given food sample deformed before it breaks.
4	Springiness	As the rate at which the deformed food material gets back in to its original condition when the applied force is removed from them. On this basis food can be divided in to two categories i.e. plastic and elastic.
5	Gumminess	As the amount of energy which is required for the disintegration a food sample which is semi solid in nature for its swallowing. Its value classified as short, mealy and pasty gummy.
6	Brittleness	As the force which is required by the food material for its fracture. It is also called brittleness, which can be varied from crumbly, crunchy to brittle.
7	Chewiness	As the amount of energy which is required for the chewing of solid food for its swallowing. On the basis of chewiness food can be classified in to Tender, chewy and tough.

I risultati strumentali e sensoriali sono spesso incoerenti tra loro. Le possibili cause di queste contraddizioni possono risiedere non solo nello stato di non equilibrio della consistenza che caratterizza gli alimenti, ma anche il fatto che le due valutazioni avvengono in tempi diversi: la valutazione strumentale avviene prima quando l'alimento è "integro", mentre la valutazione sensoriale avviene dopo la manipolazione orale. Sono numerosi gli attributi della texture associati alla struttura dell'alimento appena introdotto in bocca ad essere percepiti sensorialmente e che esercitano un significativo ruolo sulla sequenza masticatoria. Negli anni seguenti alla definizione pionieristica degli attributi della texture, si sono registrati numerosi sforzi per fornire nuove definizioni allo scopo di mettere a disposizione un numero maggiore di descrittori della complessa percezione della texture in contesti differenti, soprattutto tra Paesi diversi (Drake, 1989). Drake ha fornito un elenco di 54 termini per

descrivere la struttura e le proprietà reologiche tradotti dall'inglese in 22 lingue diverse (bahasa, cinese, ceco, danese, olandese, finlandese, francese, tedesco, greco, hindi, ungherese, islandese, irlandese, italiano, giapponese, norvegese, polacco, portoghese, spagnolo, svedese, tagalog e gallese). I termini della texture spesso includono parole onomatopoeiche ((YOSHIDA, 1970); (F.Hayakawa, 2013); (Antmann, 2010);. Come elencato da (YOSHIDA, 1970) ci sono più di 400 termini giapponesi per la classificazione della texture, molti di più rispetto che in altre lingue (Bourne, 2002). Anche alcune organizzazioni Europee per la standardizzazione ha pubblicato un lessico delle texture (disponibili per il download sui siti Web dell' ISO (https://www.iso.org/iso/iso_catalogue.htm) e ASTM International: www.astm.org). (Foegeding, 2014) et al. hanno proposto una sintesi degli attributi della texture percepiti durante il processo orale, raggruppati in due macrocategorie di trasformazioni della struttura dell'alimento introdotto (Tabella 3): proprietà principali e proprietà secondarie.

Food structure transformation process	Examples	Physical oral perception
<i>Primary processes</i>		
Dilution with saliva to form a saliva/fluid dispersion – no interactions with saliva solutes	Water or true solution where solute does not interact with saliva components	Viscosity
Dilution with saliva to form a saliva/fluid dispersion – interactions with saliva solutes	Beverages with polyphenols causing astringency Fluid emulsions where saliva induces flocculation of emulsion particles	Viscosity, friction, astringency/drying
Plastic deformation or fracture caused by deforming tongue and hard palate	Pudding, custards, Brie cheese	Firmness/hardness
Initial fracture into particles	Carrots, cookies, nuts, hard cheese	Firmness/hardness
Particle reduction	Carrots, cookies, nuts, hard cheese	Firmness, hardness, size and shape of particles
<i>Secondary processes</i>		
Particle adhesion into bolus	Carrots, cookies, nuts, hard cheese	Firmness, hardness, size and shape of particles Formation of a cohesive mass and physical properties (smoothness, roughness) of the mass
Breakdown of molecules	Salivary amylase hydrolyzing starch	Viscosity, friction
Dissolving of solid particles	Dissolution of sugar, flavor and color compounds from hard candy	Viscosity
Hydration	Particles from cookies or toast	Firmness/hardness, location
Fluid release	Fluid released from meats or fruits during chewing	Rate of release, viscosity
State change	Melting of crystalline lipids in chocolate	Solid to fluid transformation

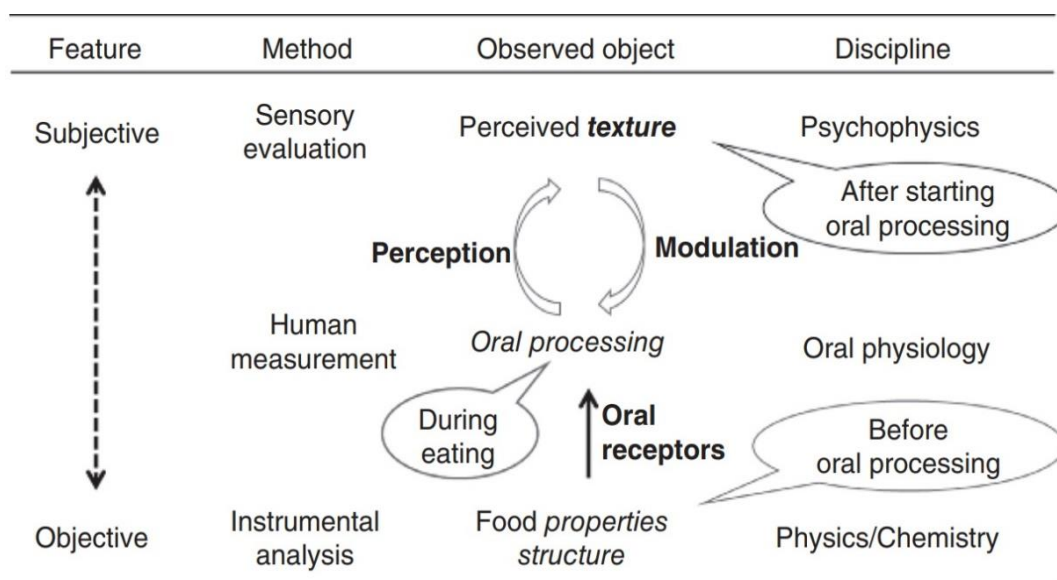
Tabella 3 *Attributi della texture percepiti durante il processo orale.*

Sono stati condotti studi comparativi internazionali per confrontare le differenze di significato tra questi nuovi termini che descrivono la texture (Antmann, 2010); (Hayakawa, 2015); (Arboleda, 2017) e (Ares, 2015) - Lopera 2017).

Allo scopo di comprendere l'importanza chiave della struttura dell'alimento nel processo orale non si può prescindere dalla necessità di determinare le proprietà di resistenza alla frattura degli alimenti solidi così come le proprietà reologiche legate alla “memoria strutturale” e alla distribuzione dei tempi di rilassamento degli alimenti semi-solidi, semi-liquidi e liquidi. Tuttavia, è necessario esaminare i cambiamenti fisici che subiscono gli

alimenti durante il processo orale al fine di definire condizioni sperimentali che simulino meglio le condizioni reali di sollecitazione in bocca e per una più efficace correlazione tra proprietà strumentali e attributi sensoriali (Nishinari, 2018). Le condizioni di temperatura, umidità dovuta alla saliva, i movimenti della masticazione, la velocità di deformazione del cibo e lo sminuzzamento dell'alimento durante la manipolazione orale non sono riproducibili dagli strumenti (se sì solo per una condizione alla volta) e questo potrebbe essere un'altra possibile causa della scarsa correlazione tra le due valutazioni (Bourne, 2002).

D'altra parte, ciascun individuo modula continuamente i meccanismi fisiologici e psicologici richiesti per la percezione sensoriale della texture degli alimenti durante il processo orale come conseguenza dell'attività biomeccanica richiesta nella preparazione e deglutizione del bolo (reciprocità tra processo orale e percezione della texture).



ANALISI SENSORIALE DELLA TEXTURE

L'analisi sensoriale della texture degli alimenti è di grande interesse nella prospettiva della progettazione e caratterizzazione della qualità degli alimenti ma anche nella prospettiva della segmentazione di mercato. Il consumatore crea aspettative sulla qualità degli alimenti attraverso le informazioni sensoriali acquisite durante l'ispezione visiva, tattile, uditiva, gustativa, olfattiva delle sue caratteristiche di texture e/o del suo imballaggio. Tali aspettative sono determinanti nel giudizio di accettabilità, preferenza, disponibilità all'acquisto e nelle decisioni al momento del consumo.

La valutazione sensoriale non è una semplice integrazione delle informazioni acquisite attraverso le diverse modalità sensoriali ponderate in funzione della dominanza dei segnali acquisiti. La valutazione sensoriale è anche il risultato della stretta interdipendenza e all'ordine cronologico delle modalità sensoriali adottate., così come dimostrato attraverso l'impiego della tecnologia aptica e immersiva basata sulla realtà virtuale che permette di manovrare in modo opportuno le sensazioni visive, uditive e tattili durante l'esperienza sensoriale. Ad esempio, l'incorporazione di appropriati elementi tattili nella esperienza sensoriale di un alimento o bevanda può indurre influenza positiva sulla percezione della texture, sul gradimento, emozioni e comportamenti all'acquisto da parte del consumatore. Tali elementi possono essere presentati al consumatore con una ampia gamma di possibilità come ad esempio attraverso la superficie del prodotto, il materiale di confezionamento e l'ambiente di esposizione (tavolo da pranzo, scaffale del supermercato). Ci sono numerosi studi nel campo delle associazioni tra la modalità orale di analisi sensoriale e le altre, ma recentemente un crescente interesse si sta registrando nell'associazione della modalità tattile alle altre.

La maggiore disponibilità di tecnologie innovative che includono la stampa 3D, la tecnologia aptica e la tecnologia immersiva basata sulla realtà virtuale offrono numerosi spunti di ricerca e innovazione per i progettisti, gli sviluppatori e i professionisti dell'analisi sensoriale e del marketing che possono risultare in un arricchimento della esperienza sensoriale e della soddisfazione (piacere e benessere al consumo) da parte del consumatore così come della competitività delle imprese alimentari.

2.1 Valutazione non orale della texture

2.1.1 Analisi visiva

L'ispezione visiva di un alimento è per il consumatore la prima esperienza sensoriale che influenza la percezione della sua qualità, seguita dall'esperienza tattile durante la manipolazione con le mani e il processo orale. L'ispezione visiva permette di valutare direttamente le proprietà della texture che generano stimoli fisici legati al colore, alle caratteristiche geometriche e al comportamento meccanico/reologico (indotto in condizioni di sollecitazione). Tuttavia, la percezione del colore può influenzare la percezione visiva della consistenza, prima ancora della sua valutazione tattile attraverso la manipolazione con le mani e durante il processo orale per effetto di meccanismi di mascheramento e/o di esaltazione delle proprietà esaminate (Spence & Katsunori, 2011). Gli autori evidenziano anche che la risposta sensoriale di un assaggiatore può evidenziare correlazioni positive e negative tra grado di piacere riferibile alla consistenza percepita visivamente e al grado di piacere riferibile alla consistenza percepita in bocca, in funzione dello specifico grado di piacere per la consistenza percepita visivamente.

2.1.2 Analisi tattile

Una recente pubblicazione scientifica (Pramudya & Seo, 2019) ha fornito una esaustiva analisi degli studi focalizzati sulla percezione aptica e tattile della texture degli alimenti. In particolare, la review si focalizza sui seguenti temi: (1) modalità percettiva della texture basata sulla sensazione aptica (attiva) e tattile (passiva) dell'alimento, (2) fattori che influiscono la percezione manuale della texture, (3) influenza delle proprietà percepite manualmente su altre modalità sensoriali di percezione della texture, e (4) l'influenza delle proprietà percepite manualmente sulla risposta emozionale e sul comportamento all'acquisto. La percezione manuale può essere attiva (percezione aptica) quando si fa esperienza simultanea delle sensazioni tattili legate al contatto con la pelle e alle sensazioni cinestetiche e propriocettive legate allo spostamento attivo dell'alimento. La pelle possiede meccanorecettori in grado di registrare stimoli fisici legati alla pressione, peso, orientamento, curvatura, texture, proprietà termiche, vibrazione. I muscoli e i tendini sono dotati di meccanorecettori sensibili a stimoli derivanti dal lavoro meccanico di spostamento dell'alimento durante la sua manipolazione e durante l'atto della sua introduzione nella bocca (Fig.1).

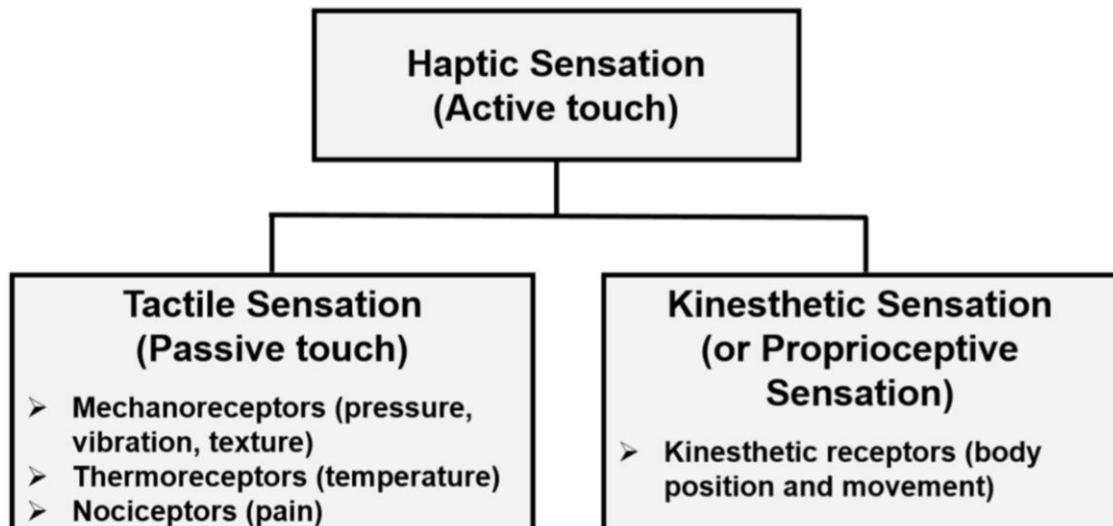


Figura 1 Meccanismi della sensazione tattile (aptica)

La temperatura della pelle influisce sulla sensibilità dell'esperienza tattile delle proprietà di superficie (rugosità e vibrazione). Anche il genere e l'età influenzano la sensibilità dell'esperienza tattile. Ad esempio, le donne hanno una maggiore sensibilità tattile rispetto alle caratteristiche di superficie, alla temperatura, di pressione e di dolore. Anche le disfunzioni, lo stato emozionale e lo stress psico-emozionale alterano/riducono la sensibilità dell'esperienza tattile.

Anche la personale motivazione e preferenza al tatto rappresenta un fattore che influenza l'esperienza tattile. Alcuni autori hanno classificato gli individui in soggetti molto autotelici e poco autotelici utilizzando in funzione del proprio "bisogno di contatto fisico" che misura la motivazione e la preferenza al tatto anche in funzione del contesto in cui sono esprimono il proprio giudizio (ad esempio al momento dell'acquisto oppure per motivi compulsivi legati al bisogno di benessere).

Numerosi studi hanno evidenziato associazioni crociate tra le diverse modalità esperienziali (visiva, uditiva, gustativa, olfattiva e tattile) nella valutazione sensoriale della texture degli alimenti (Tab. 4,5,6,7).

Types of Visual Cues	Presentation Types of Visual Cues	Types of Touch Cues	Presentation Types of Touch Cues	Key Findings	References
Hue (black/white)	Colored squares (via computer)	Vibrotactile	Computer-controlled shaker	Low-frequency vibrations were associated with a black hue; high-frequency vibrations were associated with a white hue	Martino & Marks [162]
Hue (red/white wine)	Wine color	Weight	Wine bottles	Red wine bottles were rated heavier compared to white wine	Piqueras-Fizman & Spence [163]
Luminance, chroma, hue	Color wheel (via computer)	Temperature, roughness, vibrotactile, pressure	Sandpaper (roughness), solenoid tapper (vibrotactile)	Low color luminance was associated with roughness and high pressure to skin	Ward et al. [160]
Luminance, chroma, hue	Color wheel (via computer)	Hardness/softness, pointed/roundness, roughness/smoothness	Foam cubes (hard-soft), wooden 3-D shapes (pointed-round), sandpaper-covered flat surfaces (rough-smooth)	High luminance correlated with high softness and roundness; high chroma correlated with smoothness and softness; specific color hues were associated with certain tactile sensations	Ludwig & Simner [164]
Luminance, chroma, hue	Color wheel (via computer)	Hardness, roughness, heaviness, elasticity, adhesiveness	Programmed haptic device (SensAble PHANTOM OMNI®)	High color luminance was associated with high smoothness, high softness, high elasticity, and low adhesion	Slobodenyuk et al. [161]

Tabella 4 Riepilogo dei risultati dei modelli incrociati della percezione visiva e aptica

Types of Auditory Cues	Presentation Types of Auditory Cues	Types of Touch Cues	Presentation Types of Touch Cues	Key Findings	References
Loudness, pitch	(Modified) sounds of participants rubbing their own palms together played back to the participants	Roughness/moistness, dryness/smoothness	Participants' own skin (participants rubbing their palms together)	Increased sound intensity and high pitch were more associated with higher smoothness/dryness of human palmar skin	Jousmäki & Hari [174]
Loudness, pitch	(Modified) sounds of participants touching the touch stimuli played back to the participants	Roughness	Abrasive closed-coat silicon carbide papers attached on plastic discs	Decreased sound intensity and lower pitch increased the perception of tactile smoothness	Guest et al. [170]
Loudness, auditory associations	Recorded sounds	Roughness	Programmed haptic device (SensAble PHANTOM)	Rougher textures were correlated with increased sound intensity; smoother textures were more associated with decreased sound intensity	Peeva et al. [171]
Loudness, pitch, sound type (violin vs. flute), auditory associations	Recorded sounds	Sharpness/bluntness, roughness/smoothness, hardness/softness, weight, temperature	Touch-related terms (i.e., no physical touch stimuli)	High smoothness and softness can be associated with low sound intensity, low pitch, and flute sound (compared to violin), while high sharpness can be associated with high sound intensity and flute sound (compared to violin)	Eitan & Rothschild [172]
Pitch, auditory associations	Daniel Barenhoim's recording of Beethoven's piano sonata (2 nd movement, opus 111)	Temperature, hardness/softness, weight, roughness/softness, sharpness/bluntness, size (small/large), thinness/thickness	Touch-related terms (i.e., no physical touch stimuli)	High pitch was more associated with "small", "thin", "sharp", "smooth"; low pitch was more associated with "large", "thick", "heavy", "blunt", "rough"	Eitan & Timmers (Experiment 2) [173]

Tabella 5 Riepilogo dei risultati dei modelli incrociati della percezione uditiva e aptica

Types of Olfactory Cues	Presentation Types of Olfactory Cues	Types of Touch Cues	Presentation Types of Touch Cues	Key Findings	References
Orthonasal odor	Wine (red & white); Overall aroma intensity, fruity aroma intensity	Shape	Wine glasses	Aroma intensities were rated higher when wines were served in bowl-shaped glass than in tulip-shaped glass (in white and red wines)	Cliff [178]
Retronasal odor	Hot chocolate, beer, & orange juice; Overall flavor intensity, overall pleasantness	Shape	Receptacle (bottles vs. cups vs. glasses)	Hot chocolate, beer, and orange juice were rated to be most pleasant when consumed from bottles (compared to glasses and cups)	Raudenbush et al. [189]
Orthonasal odor	Wine (red); Overall aroma intensity, fruity aroma intensity, vinegar aroma intensity, oak/woodiness aroma intensity, mustiness aroma intensity	Shape	Wine glasses	Odor intensity of red wine samples were rated as less intense when presented in tapered bulb-shaped glasses than open bulb-shaped and square-shaped glasses	Delwiche & Pelchat [179]
Retronasal odor	Wine (red & white); Overall aroma intensity, overall pleasantness	Shape	Wine glasses	Odor intensity of red and white wine samples were rated as most intense when presented in bulbous-shaped glass than tulip-shaped and beaker-shaped glasses	Hummel et al. [180]
Orthonasal odor	Lemon & animal odors	Roughness/softness	Treated fabric squares	Fabrics of varying degrees of softness were rated softer in the presence of a lemon odor (compared to an animal-like odor)	Demattè et al. (Experiment 1) [181]
Orthonasal odor, retronasal odor	Wine (toasted odor wine); Overall aroma intensity, overall quality	Shape	Wine glasses	Odor intensity of toasted wine samples were rated as most intense when presented in a specific wine glass (Schott Zwiesel type Cask-aged spirits 8432/17 with 209 x 76 mm dimensions)	Vilanova et al. [182]
Orthonasal odor	Feminine fragrance (Hanae Mori White) & masculine fragrance (Hanae Mori Black) (Experiment 1); Pumpkin cinnamon & eucalyptus-spearmint (Experiment 2); Pleasantness, likeability	Roughness/smoothness (Experiment 1); Temperature (Experiment 2)	Textured paper (Experiment 1); Gel packs (warm & cold) (Experiment 2)	Experiment 1: Smooth-textured paper was rated more positively in the presence of a feminine smell; rough-textured paper was rated more positively in the presence of a masculine smell. Experiment 2: A warm gel-pack with a "warm" pumpkin cinnamon smell was rated more positively than with a "cold" eucalyptus-spearmint smell; a cold gel-pack with a "cold" eucalyptus-spearmint smell was rated more positively than a "warm" pumpkin cinnamon smell	Krishna et al. (Experiments 1 & 2) [183]
Retronasal odor	Lemon yogurt; Overall flavor intensity	Curvature (round/angular)	Yogurt packaging/container	Angular yogurt containers were perceived as more intense in taste (compared to rounded yogurt containers)	Becker et al. [9]
Orthonasal odor	Liquid soap; Overall fragrance intensity	Weight	Soap bottles	Fragranced liquid soap in heavier bottles were rated as having a higher fragrance intensity than soap in lighter bottles	Gatti et al. [184]
Retronasal odor	Noodles; Savory flavor intensity	Shape, material	Plates, bowls (ceramic, glass, paper, metal)	No differences with regards to touch stimuli	Zhou et al. (Experiment 2) [194]
Retronasal odor	Beer; Overall flavor quality, pleasantness	Shape, material	Beer cans vs. bottles	Beers served in bottles were rated higher in taste quality (poor/good) (compared to cans)	Barnett et al. [195]
Orthonasal odor, retronasal odor	Cola & sparkling water; Overall aroma intensity, pleasantness	Shape	Glasses	The aromas of cola drinks served in cola glass were rated more intense and pleasant than when served in a straight water glass or bulbous bottle	Cavazzana et al. [185]
Orthonasal odor, retronasal odor	Beer; Overall aroma pleasantness, overall flavor pleasantness, overall flavor intensity; fruitiness aroma intensity	Shape	Glasses	Higher glass curvature was associated with higher overall odor intensity (in beer)	Mirabito et al. [186]
Retronasal odor	Ice cream; Overall flavor intensity	Sharpness/smoothness	3D-printed cups	Ice cream served in angular-surfaced bowls were rated higher in intensity	Van Rompay et al. [196]
Retronasal odor	Potato chips; Overall flavor intensity	Roughness/smoothness	Bowls	Salted chips served in rough and uneven bowls were rated higher in saltiness and taste intensity than when served in smooth and even bowls	Van Rompay & Groothedde [197]

Tabella 6 Riepilogo dei risultati dei modelli incrociati della percezione olfattiva e aptica

Table 4. The summary of findings regarding cross-modal associations between gustatory and hand-feel touch cues.

Types of Gustatory Cues	Presentation Types of Gustatory Cues	Types of Touch Cues	Presentation Types of Touch Cues	Key Findings	References
Sweetness, bitterness, sourness, saltiness	Wine (red & white); Taste intensity	Shape	Wine glasses	Red and white wine samples were rated as more sour in beaker-shaped glasses	Hummel et al. [180]
Bitterness	Lemon yogurt; Taste intensity	Curvature(round/angular)	Yogurt packaging/container	No differences	Becker et al. [9]
Sweetness, bitterness, sourness, saltiness	Cream; Taste intensity	Cutlery item material	Spoons	Spoons of different materials could transfer certain tastes and enhance the dominant taste of cream samples; Copper and zinc spoons lent a degree of bitterness and metallic flavor to the cream	Piqueras-Fizman et al. [200]
Sweetness (Experiment 1); Saltiness (Experiment 3)	Yogurt (Experiment 1); Cheese (Experiment 3); Taste intensity, pleasantness	Cutlery item weight and size (Experiment 1); Cutlery item type (Experiment 3)	Spoons (Experiment 1); Cutlery items (toothpicks vs. cheese knives vs. spoons)	Experiment 1: Yogurt was rated as sweeter when served with the smallest spoons (compared to larger spoons)Experiment 3: Cheese was rated as saltier when sampled using a knife (compared to spoon, toothpick, and fork)	Harrar & Spence (Experiments 1 & 3) [137]
Sweetness, bitterness, sourness	Cold tea	Material	Cups (glass, plastic, paper)	No differences with regards to touch stimuli	Tu et al. (Experiment 1) [142]
Sweetness	Noodles	Shape, material	Plates, bowls(ceramic, glass, paper, metal)	No differences with regards to touch stimuli	Zhou et al. (Experiment 2) [194]
Sweetness, bitterness, sourness, saltiness	Cola & sparkling water; Taste intensity, pleasantness	Shape	Glasses	Cola drinks served in a cola glass were perceived to be sweeter and more pleasant than when served in a water glass or bulbous bottle	Cavazzana et al. [185]
Sweetness, bitterness	Beer; Taste intensity	Shape	Glasses	Higher glass curvature was associated with a higher fruitiness (in beer)	Mirabito et al. [186]
Sweetness, bitterness	Hot chocolate & coffee; Taste intensity, overall liking	Curvature (round/angular)	3D-printed cups	Drinks served in angular-surfaced cups were rated higher in bitterness and intensity; Drinks served in rounder-surfaced cups were rated higher in sweetness and lower in intensity (in hot chocolate and coffee)	Van Rompay et al. [198]
Sweetness, sourness	Ice cream; Taste intensity	Sharpness/smoothness	3D-printed cups	Ice cream served in smoother-surfaced bowls were rated higher in sweetness; No differences on sourness	Van Rompay et al. [196]
Saltiness	Potato chips; Taste intensity	Roughness/smoothness	Bowls	Salted chips served in rough and uneven bowls were rated higher in saltiness and taste intensity than when served in smooth and even bowls	Van Rompay & Groothedde [197]

Tabella 7 Riepilogo dei risultati dei modelli incrociati della percezione gustativa e aptica

2.2 Valutazione orale della texture

L'essere umano raccoglie la maggior parte delle informazioni sulla consistenza durante la fase di manipolazione manuale che avviene poco prima di assumere l'alimento e durante il processo orale (le fasi di lavorazione antecedenti e le fasi digestive dopo la deglutizione non sono di importanza rilevate per il consumatore al fine dell'apprezzamento della texture).

Quando mangiamo un alimento esso viene trattato utilizzando la lingua e i denti e successivamente viene ingerito. Il tempo necessario alla completa elaborazione è molto breve, all'incirca 1 secondo per i liquidi come l'acqua, 10 secondi per liquidi densi e semisolidi e 100 secondi per i cibi duri (Kohyama, 2015).

Le proprietà fisiche del cibo non raggiungono mai uno stato di equilibrio durante questo breve periodo: la struttura del cibo viene degradata e mischiata con la saliva per la preparazione del bolo fino ad essere adatto per essere deglutito (Hutchings & Lillford, 1988); (Chen, 2009); (Koç, et al., 2013); (Kohyama, 2015); (Lillford, 2018); (Nishinari & Fang, 2018). Recentemente, (Jeltemaa, et al., 2015) hanno suggerito che la consistenza del cibo è determinata anche dal processo orale e dai movimenti che compie ogni individuo con la bocca. Sono stati definiti quattro modelli differenti di comportamenti durante l'elaborazione orale del cibo (chewer, cruncher, smoother e sucker) ed è stato dimostrato che questi soggetti percepiscono in modo diverso la consistenza di uno stesso alimento.

La percezione della consistenza di un alimento è determinata inoltre dalle capacità individuali espresse in termini di soglie assolute e differenziali (nelle comparazioni), dall'età, stato di salute, esperienza pregressa rispetto all'alimento e le condizioni ambientali dove si svolge la valutazione sensoriale.

2.2.1 Processo orale

Il processo orale rappresenta il primo stadio nel consumo degli alimenti e coinvolge una prima complessa sequenza di operazioni volontarie che include il primo morso, cicli di disgregazione meccanica (masticazione), trasporto, idratazione con la saliva e formazione del bolo e una successiva sequenza di operazioni involontarie che innescano il processo di deglutizione del bolo e lo smaltimento del suo residuo aderente ai tessuti del cavo oro-faringeo ed esofageo. I meccanismi di controllo e i principi che governano l'intero processo orale non sono ancora stati completamente chiariti, nonostante i continui sforzi effettuati da

scienziati appartenenti ai diversi campi di ricerca coinvolti e che includono la neurofisiologia, la medicina clinica e dentale, la psicologia e la scienza degli alimenti. La complessità del processo orale non è solamente legata alla numerosità delle strutture anatomiche coinvolte (muscoli, segmenti ossei, recettori e rete neurale, ecc), bensì anche alla complessa relazione di causa-effetto tra le successive operazioni orali, ognuna delle quali deve consentire una precisa sequenza di risultati, attraverso il coordinamento dei meccanismi di trasformazione dell'alimento in bolo coesivo e confortevole.

Il processo orale non è importante solo ai fini dell'assunzione e successivo assorbimento dei principi nutritivi dell'alimento, ma consente anche la percezione sensoriale della texture che ne determinano la scelta di consumo e l'apprezzamento edonistico. Durante il processo orale, infatti, l'alimento genera simultaneamente diversi stimoli chimico-fisici percepiti sensorialmente che sono legati all'aspetto visivo, all'aroma, al gusto e alla sua struttura fisica e al suono eventualmente prodotto. È importante chiarire fin da subito che la texture degli alimenti, la sua percezione sensoriale e il processo di trasformazione orale s'influenzano reciprocamente. In particolare, la sequenza delle operazioni volontarie determina la dinamica della percezione sensoriale della texture, che a sua volta svolge un'importante funzione di attivazione/inibizione e di regolazione della sequenza di preparazione e deglutizione del bolo. Ulteriore contributo alla complessità del processo orale è dato dalla grande variabilità nella composizione chimica, stato fisico e proprietà meccaniche degli alimenti introdotti, nelle caratteristiche dell'individuo che includono età, sesso, stato di dentizione, abilità masticatoria residua legata ad eventuali malformazioni o malattie neurodegenerative.

Negli ultimi anni sta guadagnando un grande consenso nella comunità scientifica un nuovo paradigma del processo orale la cui valutazione completa impone lo studio delle relazioni tra aspetti fisiologici coinvolti, texture, proprietà reologiche e tribologiche dell'alimento (Mosca & Chen, 2016). Tra gli aspetti fisiologici il comportamento masticatorio, la salivazione e la deglutizione. La *masticazione* è responsabile delle trasformazioni che continuamente modificano la struttura e le proprietà reologiche dell'alimento introdotto nel cavo orale. La masticazione è solitamente valutata misurando strumentalmente la forza del primo morso, lo sforzo compiuto dalla lingua, l'attività muscolare mandibolare, la frequenza e la durata dei movimenti della mandibola. La *deglutizione* implica una serie di azioni coordinate che permettono il passaggio del bolo coesivo dalla cavità orale allo stomaco attraverso il transito faringeo ed esofageo. La deglutizione è solitamente valutata misurando strumentalmente l'attività dei muscoli della lingua, la frequenza e la durata delle

deglutizioni, volume del bolo, quantità del residuo di bolo sulla parete del cavo faringeo ed esofageo. La *salivazione* contribuisce alla formazione di un bolo coeso e deglutibile a seguito della disgregazione della struttura originaria dell'alimento, dell'idrolisi enzimatica di alcuni componenti e dell'incorporazione della saliva che agisce come plasticizzante e lubrificante. La composizione chimica, la microstruttura, le proprietà meccaniche e tribologiche dell'alimento introdotto nel cavo orale determinano le caratteristiche di deformazione, di scorrimento, fluidodinamiche e frizionali del bolo.

Il processo orale rappresenta il primo stadio del processo digestivo. Le azioni di deformazione, destabilizzazione e riduzione delle dimensioni sono svolte all'interno della cavità orale attraverso l'azione coordinata tra denti, lingua e saliva. La cavità orale rappresenta lo spazio compreso tra le labbra e il velo palatino, il quale permette la separazione dalla cavità nasale e dalla faringe durante la deglutizione, e rappresenta il primo tratto del percorso digestivo all'interno del quale un alimento è elaborato e percepito sensorialmente fino a raggiungere condizioni deglutibili.

I denti svolgono funzioni di demolizione della struttura dell'alimento solido e semi-solido. Gli incisivi e i canini sono deputati al taglio di strutture semi-solide con comportamento resiliente (elastico, gommoso), mentre i molari sono deputati principalmente per fratturare gli alimenti solidi con comportamento fragile (vetroso) e per ridurre le dimensioni delle frazioni risultanti dalla frattura principale.

Dal punto di vista anatomico i denti presentano diverse aree funzionali. La parte esposta (corona) è utilizzata direttamente per la deformazione e triturazione degli alimenti solidi; la parte non esposta è la radice ricoperta dalla gengiva. La parte esterna del dente è rivestita da smalto (materiale molto resistente); la parte centrale interna, nominata "polpa dentale", è formata da tessuto connettivo molle all'interno del quale sono presenti vasi sanguigni e nervi che percorrono il dente dall'apice alla radice. I nervi dentali sono deputati alla trasmissione degli stimoli fisici (meccanici e termici) generati dal contatto con gli alimenti durante la masticazione. Il legamento parodontale (tessuto connettivo specializzato) contribuisce all'ancoraggio di ciascun dente al segmento alveolare corrispondente e, inoltre, permette la captazione degli sforzi meccanici durante la masticazione comportandosi come un vero e proprio "trasduttore di pressione". Al primo morso e durante la masticazione, i denti generano elevati sforzi meccanici sulla superficie dell'alimento. Lo sforzo, inteso come rapporto tra forza e superficie su cui è applicata la forza stessa, può facilmente disperdersi per effetto della conseguente deformazione reversibile dei legamenti parodontali che ne consentono un relativo incremento di superficie. Le fibre nervose dentali, che sono sensibili

alle deformazioni del legamento parodontale, inviano informazioni qualitative e quantitative sugli sforzi meccanici necessari per la masticazione al sistema nervoso centrale per la loro interpretazione.

La forza applicata dai denti (forza mordente) varia in funzione dell'etnia, sesso, stato di salute e dentizione. (Bourne, 2002) ha documentato che i maschi sono generalmente in grado di applicare forze mordenti maggiori (fino al 50% in più) rispetto alle femmine e che gli eschimesi sono capaci di esercitare una forza maggiore rispetto agli americani (Tabella 8).

	MASCHI		FEMMINE	
	Forza media [N]	Forza massima [N]	Forza media [N]	Forza massima [N]
ESCHIMESI	1202	1549	890	1451
AMERICANI	534	890	378	734

Tabella 8 Forza mordente esercitata da soggetti di diversa nazionalità e sesso

Utilizzando un sensore di pressione a forma di U per misurare la forza mordente esercitata dal dente incisivo centrale in 18 adulti, (Paphangkorakit, 1997) et al. hanno registrato un ampio intervallo di forza mordente, compreso tra 110 e 370N. Questo risultato evidenzia che a parità di alimento la sua texture può essere percepita in modo differente da consumatori diversi. Un alimento che richiede 200N per la sua prima frattura potrebbe essere percepito come poco resistente e fragile per un soggetto in grado di esercitare una forza mordente massima di 370N, ma potrebbe essere percepito come molto resistente e non fratturabile per chi riesce ad esercitare una forza mordente massima di 110N (Chen, 2009). La forza mordente applicabile varia non solo individualmente ma anche in funzione dello specifico dente utilizzato. (Mioche, et al., 1995) documentarono che gli incisivi esercitano la forza mordente minore potendo arrivare mediamente fino a 150N, i canini esercitano forze intermedie potendo applicare fino a 300N, mentre i molari sono in grado di applicare forze superiori a 500N fino a 800N.

Sebbene i denti siano capaci di esercitare tali forze, non significa che durante la masticazione il massimo di questi valori viene effettivamente raggiunto. La forza utilizzata è quella strettamente necessaria per superare la resistenza meccanica dell'alimento, come risultato del processo percettivo della texture. Oltre alla forza e alla pressione (sforzo), i denti sono molto sensibili anche alle vibrazioni, quindi al tempo e alla frequenza con cui è applicata la forza. La percezione vibro-tattile dei denti è probabilmente una ragione importante per cui i consumatori con difficoltà uditive sono ancora in grado di divertirsi mangiando cibi

croccanti e friabili (Chen, 2009), mentre perdono questa capacità i consumatori che indossano delle protesi dentarie in quanto non vi è più il collegamento tra i denti e il sistema nervoso. Senza una tale connessione, la percezione della pressione, della forza e delle vibrazioni risulta compromessa.

La lingua svolge un ruolo determinante sia nell'espressione verbale dell'individuo sia nel processo orale dell'alimentazione. I movimenti e le conformazioni che assume la lingua durante le diverse fasi del processo orale sono finemente controllati da riflessi volontari e involontari, attuati per mezzo delle fibre nervose e dei muscoli.

È costituita da un grande fascio di muscoli striati che occupa la maggior parte dello spazio della cavità orale. La lingua non contiene supporti ossei per l'inserzione dei suoi muscoli, e il suo coordinamento dipende interamente dai fasci muscolari estrinseci che la ancorano saldamente alle ossa circostanti. Convenzionalmente la lingua viene divisa in una parte orale (circa i due terzi anteriori della lingua) che si trova principalmente all'interno del cavo orale bocca e una parte faringea (circa il terzo posteriore della lingua) che è rivolta all'indietro verso dell'orofaringe.

La superficie della mucosa dorsale della lingua è costituita da un epitelio squamoso stratificato contenente numerose gemme sensoriali gustative, gruppo di cellule specializzate alla registrazione della sensazione associata agli stimoli chimici e fisici. Le gemme con capacità sensoriali gustative si differenziano secondo un criterio morfologico in papille filiformi (a forma di filo), fungiformi (a forma di fungo), circumvallate (cerchio ad anello) e foliate. Tutte le gemme, eccetto quelle filiformi, hanno papille gustative sulla loro superficie, e quindi sono in grado di registrare la sensazione associata a vari gusti e sapori. Al momento dell'introduzione in bocca di un alimento l'apice della lingua si trova depresso per favorire l'accoglienza del boccone che, grazie a movimenti di tipo *pull-back*, è trasportato nella regione post canina per consentirne la deformazione e la disgregazione. Durante le successive sequenze masticatorie la lingua cambia ancora la sua conformazione anatomica. Nei cicli masticatori la lingua compie movimenti sia *pull-back* che verticali poiché è richiesta una selezione delle particelle idonee, quelle più piccole e lubrificate, per la formazione del bolo e il suo trasporto verso l'orofaringe. La lingua è quindi un organo essenziale sia come strumento percettivo della texture, del sapore, della temperatura, sia come mezzo meccanico che permette la manipolazione degli alimenti e la discriminazione dei frammenti derivanti dalla loro frattura primaria e successiva.

La saliva svolge un ruolo cruciale nel processo orale, favorendo il legame tra le particelle derivanti dalla disgregazione strutturale dell'alimento e la formazione del bolo, anche grazie

alla digestione enzimatica operata dalle amilasi. Inoltre, permette la lubrificazione della cavità boccale (grazie alla presenza di mucine), la dissoluzione delle molecole aromatiche per liberare il sapore e la rimozione dei residui di bolo dalla mucosa. È possibile inoltre che la saliva sia coinvolta nella destabilizzazione dei colloidi presenti nelle emulsioni alimentari grazie ai diversi possibili meccanismi di aggregazione: flocculazione indotta dai sali, flocculazione per deplezione (dovuto al flusso di materiale che separa i colloidi), flocculazione per legami ionici, coalescenza (fusione tra colloidi). La presenza di saliva è essenziale durante il consumo di alimenti, soprattutto se questi sono di natura solida e/o con basso contenuto di umidità. Da un punto di vista compositivo la saliva è costituita dal 98% di acqua. Il restante 2% include elettroliti, muco, glicoproteine, proteine, composti antimicrobici, enzimi (Levine, et al., 1987). Questo complesso fluido biologico è prodotto da ghiandole a secrezione sierosa annesse alla cavità orale: le ghiandole maggiori (parotide, mandibolari e sottolinguali) e le ghiandole minori (labiali, malari, palatine e linguali). La secrezione di saliva può avvenire sia in presenza che in assenza di stimoli esterni. Pertanto, la saliva può essere classificata come *saliva stimolata* e *saliva non stimolata* rispettivamente. La salivazione è legata anche ad altri fattori individuali tra i quali la vista di un alimento gradevole o sgradevole, l'età, lo stato di salute, l'uso di farmaci, malformazioni anatomiche e danni cerebrali. La natura sieromucosa della saliva permette il rivestimento e la lubrificazione delle mucose orali agendo da barriera contro le irritazioni. (Prinz, et al., 2017) hanno mostrato che l'effetto lubrificante diventa più efficiente, consentendo più bassi livelli del coefficiente di frizione, inteso come attrito cinetico, durante il trasporto del bolo e gradienti di velocità più elevati durante lo scorrimento a bassi sforzi di taglio.

Durante il processo orale la saliva interagisce in modo attivo con le componenti di un alimento favorendo la destrutturazione dello stesso e la formazione della nuova struttura tipica del bolo. Durante le prime fasi del processo orale circa il 50% dell'amido del pane e il 25% dell'amido della pasta vengono idrolizzati per opera degli enzimi salivari (amilasi) (Hoebler, et al., 1998); (Hoebler, et al., 2000). La parziale idrolisi della frazione amidacea di un alimento condotta a livello orale dagli enzimi α -amilasici rende l'alimento meno resistente alla deformazione e allo scorrimento in bocca. Tuttavia, il tasso di idrolisi dell'amido viene influenzato dalla microstruttura dell'alimento, che ne regola l'accesso delle proteine enzimatiche.

La trasformazione dell'alimento durante il processo orale è necessaria sia per l'apprezzamento della texture, sapore e aroma (Panouille', et al., 2016) sia per raggiungere la struttura confortevole alla deglutizione (Vandenberghe-Descamps, et al., 2018),

richiedendo una lunga serie di operazioni biomeccaniche a partire dal primo morso (*first bite*) fino alla deglutizione e alla progressiva scomparsa del film residuale adeso ai tessuti oro-faringei ed esofagei.

L'elaborazione orale degli alimenti è un processo molto complesso e implica una serie di decisioni e operazioni biomeccaniche in una precisa sequenza e ben coordinate tra loro (Chen, 2009). Alcuni autori hanno fatto ricorso a modelli di esemplificazione per descrivere la complessità della gestione orale di un alimento. Il modello formulato da (Hutchings & Lillford, 1988) è considerato adeguato a descrivere la percezione della texture durante il processo orale. I modelli elaborati da (Karen M. Hiiemae, 1999) e da (Lucas P.W., 2002) sono quelli più accreditati nella comunità scientifica per la descrizione semplificata delle fasi del processo orale e delle strategie gestionali coinvolte.

(Hutchings & Lillford, 1988), utilizzando un approccio reologico negli studi sulla texture dell'alimento e del bolo, hanno proposto un modello dinamico per caratterizzare la percezione della texture. Il concetto sul quale si fonda questo modello è basato sul percorso di ripartizione dell'alimento durante il processo orale. Questo modello interpreta la percezione della texture secondo tre aspetti: il grado di struttura iniziale e residuo, il livello di lubrificazione e il tempo di elaborazione orale (Figura 2).

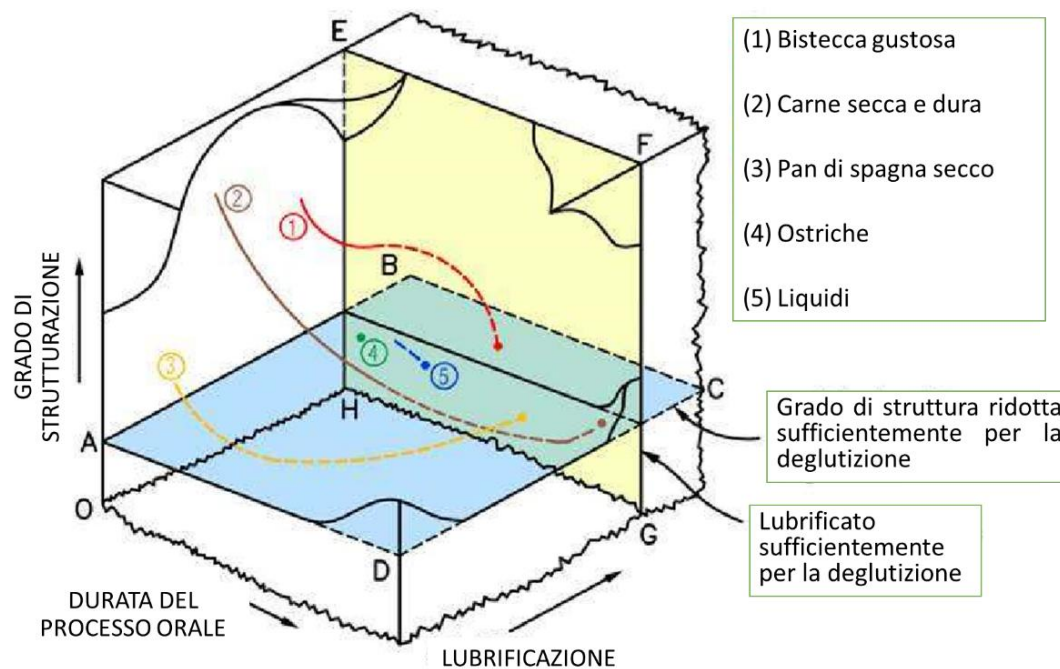


Figura 2 : Processo orale: modello di Hutchings e Lillford

Il grado di struttura residuo è riferito alle trasformazioni fisiche cui va incontro l'alimento durante la masticazione, dalla sua struttura originaria a quella di un bolo coesivo. Tale parametro dipende dalle proprietà di bulk del materiale alimentare. Quando si fa riferimento

alla struttura di un alimento, è necessario considerare il grado di organizzazione e interazione tra i costituenti su ampia scala dimensionale. Le interazioni fanno scaturire diversi livelli di complessità strutturale, che si estende dalla scala sovra-molecolare a macroscopica passando da una matrice liquida ad una semi-liquida, semi-solida e solida (Figura 3).

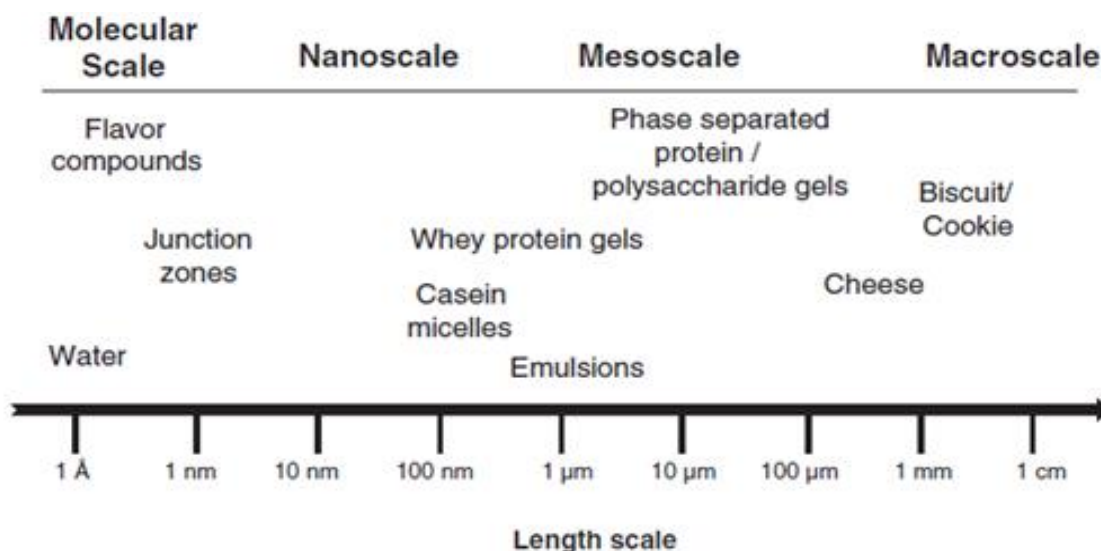


Figura 3 Scala dei livelli di struttura (dal molecolare al macroscopico)

Il grado di lubrificazione è riferito all'incorporamento della saliva nel bolo, contribuendone all'idrolisi dei polisaccaridi, all'idratazione e conseguentemente alla maggiore coesività e fluidità. L'entità della lubrificazione dipende dallo stato in cui si trova la bocca prima dell'assunzione di cibo e dalle interazioni tra l'alimento e le superfici orali. ***Sono richiesti dei valori minimi sia per il grado di struttura residua sia per il grado di lubrificazione per attivare il trasporto del bolo dalla cavità orale al tratto orofaringeo dell'esofago.*** Il tempo è riferito alla durata della sequenza del processo orale.

Il concetto di coinvolgere l'esperienza orale negli studi sulla texture alimentare è stato un notevole sviluppo che ha permesso di passare da una valutazione statica a una dinamica della texture. Nell'arco temporale che va dall'assunzione dell'alimento fino alla deglutizione del bolo è possibile percepire **gli attributi della texture** in modo dinamico e sequenziale con riferimento a momenti precisi della sequenza masticatoria (Figura 4).

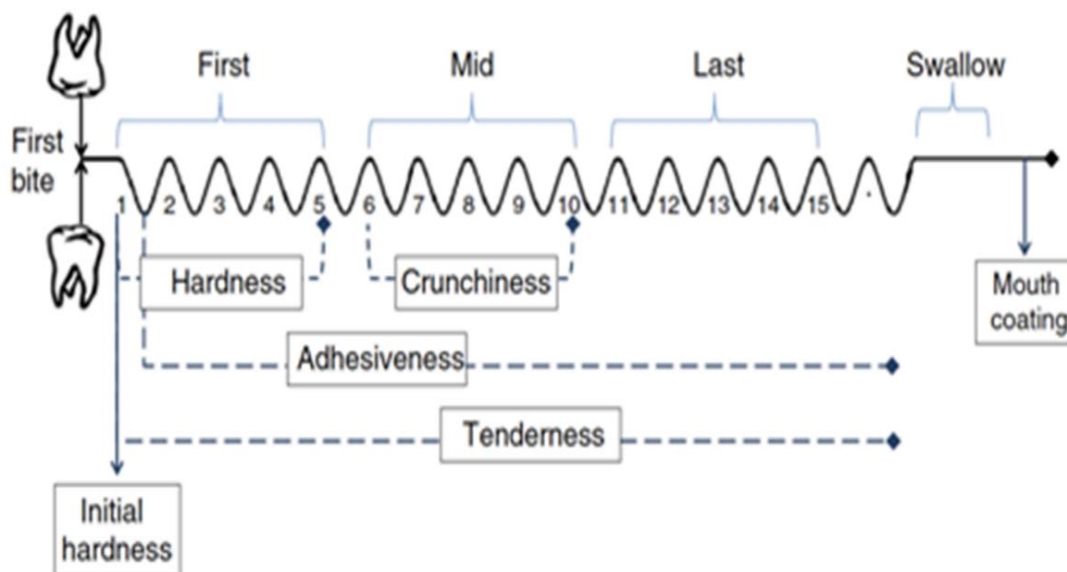


Figura 4 Percezione della texture durante il processo orale

Durante il primo morso (*first bite*) si percepisce la durezza iniziale (*initial hardness*); nella prima masticazione (*early chew-down*) si percepisce la durezza (*hardness*); durante la fase intermedia di masticazione si percepisce l'estendibilità (*tenderness*); nella tarda masticazione (*late chew-down*) e post deglutizione (*after swallow*) si percepisce la capacità di aderire alla superficie dei tessuti (*mouth coating ability o adhesiveness*). L'adesività (*adhesiveness*) e l'estendibilità (*tenderness*) sono percepite durante l'intera sequenza masticatoria e prima della deglutizione.

Hiiamae e Pamer (1999) proposero per gli alimenti solidi un modello di processo orale a due stadi di trasporto che separano la fase di ingestione, trasformazione e deglutizione del bolo come risultato del processo decisionale legato alla percezione di specifici elementi della texture (Figura 5). In questo modello, le due fasi di trasporto sono attivate per effetto del processo decisionale sulla gradevolezza o disgusto dell'alimento. In particolare, l'osservazione diretta dell'alimento insieme al pregiudizio (aspettative precostituite) determinano la decisione al consumo e il conseguente trasporto dell'alimento in area post canina. L'attività biomeccanica della mandibola e della lingua, l'attività fisiologica dei meccanorecettori insieme alle proprietà materiali dell'alimento, che includono la sua capacità di essere destrutturato/ristrutturato, idratato/deidratato, subire transizioni di fase e di formare un bolo coesivo, determinano la decisione alla deglutizione e il conseguente trasporto verso il cavo oro-faringeo attraverso le fauci.

Lo stadio di trasporto I. È la fase che comprende l'introduzione e il posizionamento dell'alimento nella superficie occlusale dell'area post-canina. Il contatto dell'alimento con i denti molari è reso possibile grazie ai movimenti di pull-back compiuti dalla lingua. Al momento dell'introduzione di un alimento solido o semisolido in bocca, mandibola e mascelle si trovano distanziate e, all'interno dello spazio della cavità buccale, la lingua si presenta con l'apice depresso per accogliere l'alimento. In concomitanza alla chiusura della mandibola, la lingua compie dei movimenti orizzontali, più precisamente di retrocessione che contribuiscono al restringimento dell'orofaringe a livello dell'epiglottide e portano l'alimento nella regione post-canina, così da essere sottoposto all'elaborazione orale. Se un alimento è percepito come nocivo o disgustoso viene espulso in questo stadio (Chen, 2007).

L'elaborazione, altresì nota come masticazione o fase di preparazione orale o fase buccale, comporta la triturazione dell'alimento in concomitanza alla lubrificazione con la saliva fino all'ottenimento di una massa coesiva denominata bolo. La riduzione dell'alimento in particelle di dimensioni minori, attraverso l'applicazione delle forze mordenti di frattura, taglio e deformazione segue la teoria di ripartizione formulata da Epstein (1947). In tale teoria si tiene conto della distribuzione delle dimensioni delle particelle che è in funzione della probabilità del materiale di fratturarsi e del grado di frammentazione delle stesse (G.M.Bornhorst & Singh, 2011).

La masticazione è un processo bio-meccanico attuato con il coinvolgimento dei denti e della lingua coordinati da strutture muscolari e nervose. L'andamento di questo meccanismo è caratterizzato da una sequenza di cicli masticatori, ciascuno dei quali è suddiviso in fase di chiusura, fase di potenza e occlusione, e fase di apertura. Durante la fase di chiusura è garantito il contatto tra i denti dell'arcata inferiore con quelli dell'arcata superiore, attraverso i movimenti verticali a cui è sottoposta la mandibola. Durante la fase di potenza o di occlusione si verifica la deformazione dell'alimento a seguito della trasmissione delle forze applicate dai denti. La fase di apertura comporta l'allontanamento della mandibola dalla mascella, con il conseguente rilassamento parziale della struttura residuale dell'alimento.

La secrezione della saliva è il secondo meccanismo presente nella fase di elaborazione orale ed è simultaneo alla frattura e deformazione dell'alimento.

I diversi moti compiuti dalla lingua contribuiscono a esercitare un'azione di selezione sulle particelle. Nella regione retrostante l'apertura della rima buccale permangono le particelle che devono subire un'ulteriore disgregazione. Grazie ai movimenti verticali, che premono la lingua contro il palato duro, vengono esercitate forze che permettono la formazione del bolo nella regione più distale della cavità orale (stadio di trasporto II).

Lo stadio di trasporto II si verifica contemporaneamente alla fase di elaborazione orale e permette lo spostamento distale delle particelle ancora separate e la successiva formazione del bolo. L'attività motoria della lingua è fondamentale poiché attraverso i movimenti verticali che la portano a contatto con il palato duro vengono generate forze di "squeezing" che consentono alle particelle con dimensioni ottimali di raggiungere la regione posteriore della cavità orale comunicante con l'orofaringe. In questa regione grazie alla tensione superficiale esercitata dalla saliva e ai movimenti della superficie faringea della lingua, le particelle iniziano a coesistere in un'unica massa, il bolo, che sarà oggetto della deglutizione. Il bolo permane in questa regione finché è innescato lo stimolo che consente il suo passaggio nell'orofaringe. Il sistema nervoso centrale usa le informazioni sensoriali provenienti dalla cavità orale, derivanti dalla percezione dinamica della texture, per informare e guidare i movimenti e le pressioni esercitate dalla lingua per comprimere con successo il bolo nella faringe (Pouderoux P., 1995). Lo stadio di trasporto modello II di trasporto a due fasi è molto utile nel descrivere il movimento del cibo all'interno della bocca, anche se potrebbe non essere necessariamente fedele alla sequenza reale. Nonostante non sia ancora disponibili studi focalizzati sulla chiara visualizzazione della sequenza degli stadi del processo orale, è stato possibile confrontare la registrazione dei movimenti della mandibola nelle tre dimensioni con la sequenza di operazioni insite nel modello a due fasi (Figura 6). La sequenza delle operazioni della mandibola durante il processo orale è chiaramente identificabile. I movimenti appaiono piuttosto regolari durante la maggior parte dei cicli masticatori, ma diventano irregolari durante lo stadio di deglutizione e di schiarimento. Dal tracciato è possibile osservare che se lo stadio di trasporto I è bene distinguibile, altrettanto non è valido per lo stadio di trasporto II, probabilmente a causa di contemporaneità con lo stadio di masticazione e di selezione delle particelle.

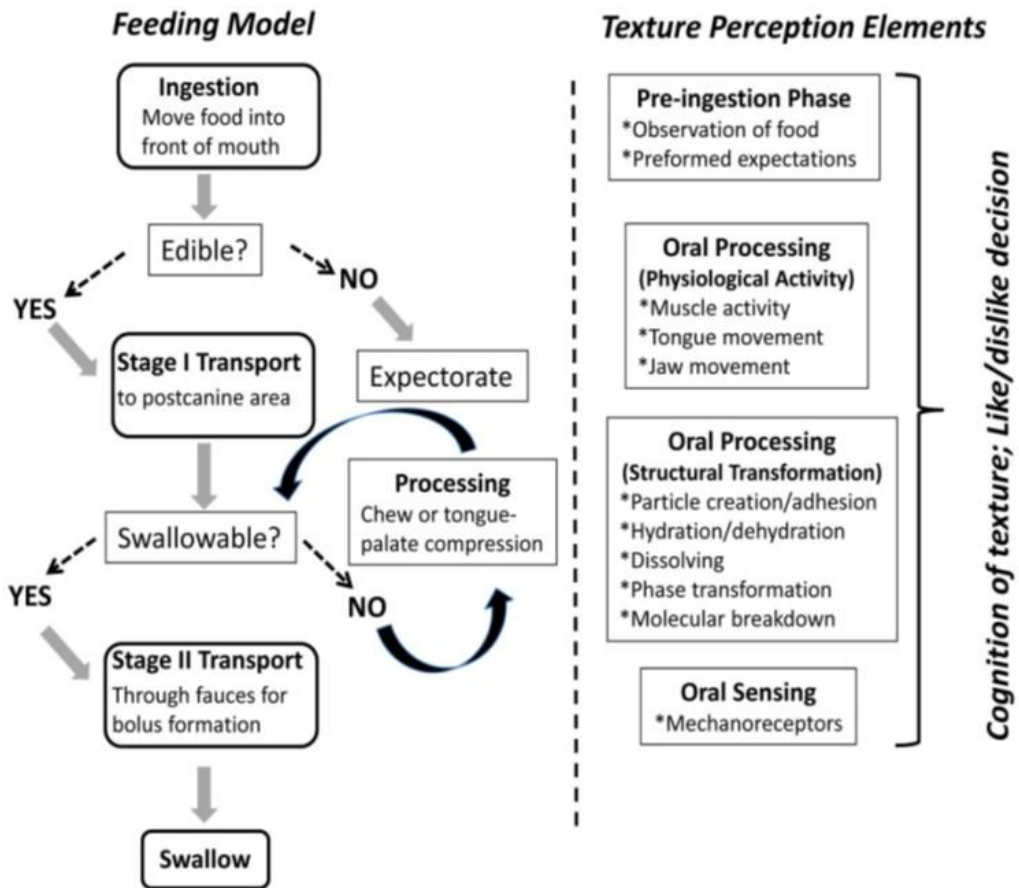


Figura 5 Processo orale a due stadi: modello di Hiimae e Pamer (1999)

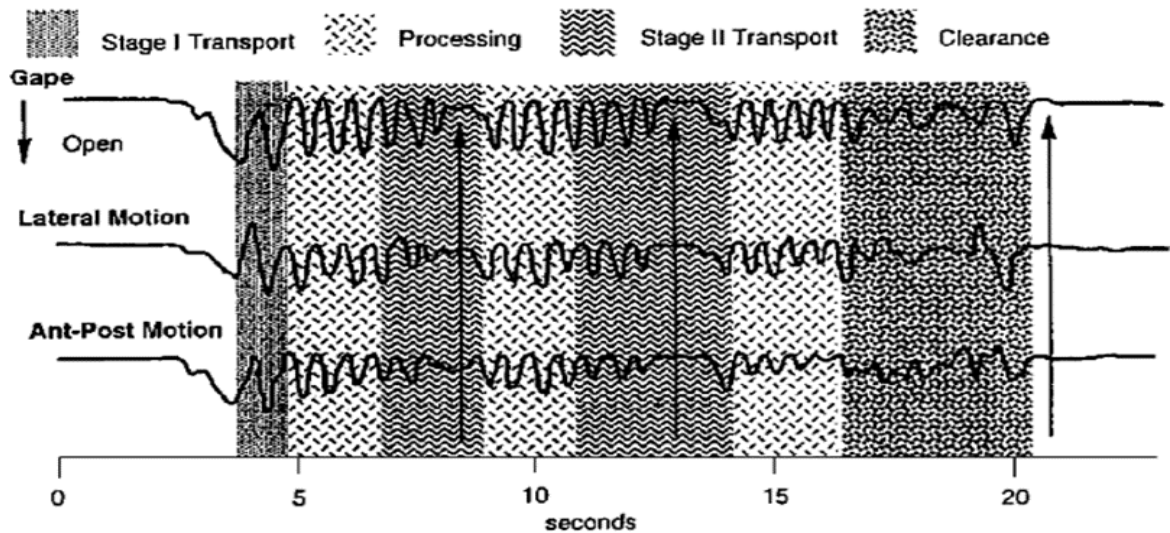


Figura 6 Movimenti della mandibola nelle tre dimensioni

Nel modello formulato da (Lucas P.W., 2002) è stata proposta una diversa semplificazione per descrivere l'esperienza orale, includendo la presa (*grip*), il primo morso, la rottura, la

riduzione delle dimensioni, il trasporto e la deglutizione, differenziando le decisioni da prendere sulle operazioni da condurre durante il processo orale (Figura 7).

La prima decisione a dover essere presa è quella di valutare se è richiesta una frattura prima di dover deglutire l'alimento. Per esempio, un cibo liquido è trasportato direttamente senza subire una disgregazione in particelle in dimensioni minori. Viceversa, un alimento solido richiede un certo livello di destrutturazione e, in quest'ultimo caso, è necessario stabilire dinamicamente se l'alimento assunto debba essere sottoposto a disgregazioni successive oppure se le particelle ottenute possano essere direttamente trasportate e deglutite.

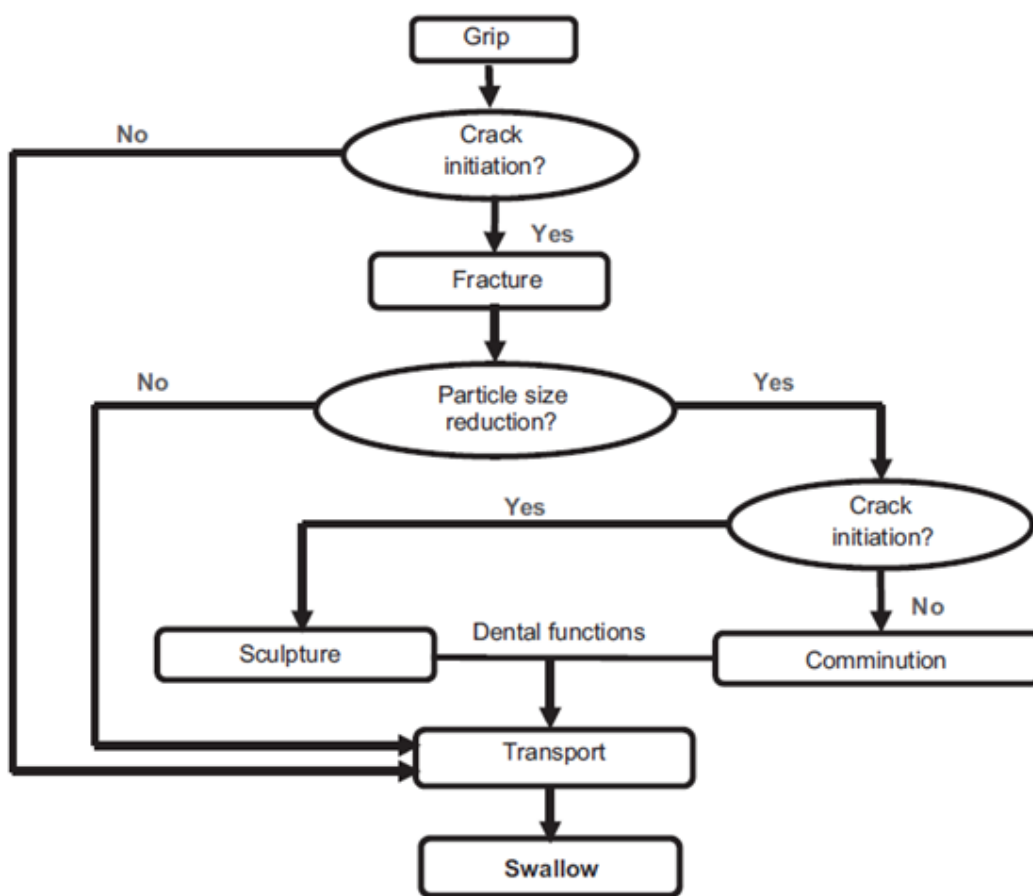


Figura 7 Processo orale: modello di Lucas et al. (2002)

La deglutizione è la fase involontaria e conclusiva del processo orale. È un meccanismo motorio, che, attraverso il coordinamento sensoriale e temporale della configurazione delle componenti anatomiche coinvolte, permette il passaggio sicuro ed efficiente del bolo dalla cavità orale allo stomaco.

Utilizzando la video fluoroscopia è stato dimostrato da (Okada, et al., 2007) che la deglutizione del bolo interessa singolarmente aliquote di alimento piuttosto che l'intera massa prodotta attraverso la masticazione. Questo significa che sono previste sia deglutizioni

multiple (o interposte) precedute e susseguite da sequenze masticatorie, sia una deglutizione terminale ed isolata che ripulisce la cavità orale e l'orofaringe dai residui di bolo rimasti adesi alle mucose.

Ciascuna deglutizione viene divisa in tre fasi a seconda delle regioni anatomiche coinvolte (Chen, 2009); nello specifico gli stadi sono quello faringeo, quello esofageo e quello gastrico.

Fase faringea. È una delle fasi deglutitorie più complesse che inizia nel momento in cui viene innescata la deglutizione e termina con il superamento dello sfintere esofageo superiore (Chen & Lolivret, 2011). Rappresenta la prima fase involontaria dell'intero meccanismo orale, riferito alla deglutizione ed è l'input sensoriale a regolarne l'innescamento.

Lo stadio faringeo è caratterizzato dalla riconfigurazione dei tratti anatomici: attraverso una serie di modifiche muscolari si permette la formazione di un preciso percorso che viene interessato dal passaggio del bolo. Tale riconfigurazione, una volta che il bolo ha superato la giunzione glosso-palatale, è caratterizzata da cambiamenti che comportano:

- la chiusura dello sfintere velo-esofageo per impedire l'entrata di materiale nella rinofaringe;
- l'inizio della peristalsi faringea (peristalsi primaria) per far progredire il bolo. Il funzionamento peristaltico può essere spiegato paragonando questo tratto ad un tubo le cui pareti sono capaci di compiere movimenti ondulatori: all'inizio del processo, il materiale è spinto all'ingresso del tubo dalla base della lingua causando un aumento di diametro di quest'ultimo. Dopo poco tempo si apre l'uscita della dilatazione e la parete vicino all'entrata del tubo inizia a chiudersi spingendo ulteriormente il fluido verso l'uscita. Questo meccanismo si ripete finché il tratto faringeo non termina.
- chiusura dell'epiglottide con movimento antero-posteriore. La chiusura dello spazio epiglottico permette al bolo di seguire il percorso del tratto digerente, proteggendo le vie aeree dalla possibile aspirazione; in soggetti affetti da disfagia è frequente riscontrare aspirazione poiché il controllo orale dell'alimento è difficoltoso o a seguito di altre patologie la muscolatura è rallentata.
- apertura dello sfintere esofageo superiore per permettere l'ingresso del bolo nell'esofago. Per spiegare l'apertura di questo sfintere si propone la metafora del tubo vista in precedenza: alla fine del processo la struttura del tubo collassa completamente e l'intero fluido viene spinto attraverso l'uscita del tubo (corrispondente allo sfintere esofageo superiore).

Fase esofagea. Corrisponde ad una fase involontaria che precede l'ingresso del bolo nello stomaco infatti, inizia nel momento in cui il bolo oltrepassa lo sfintere esofageo superiore (UES) e termina quando la massa oltrepassa lo sfintere esofageo inferiore (LES) per entrare nello stomaco. La contrazione muscolare, che permette il proseguimento del bolo in senso cranio-viscerale, viene esercitata dai muscoli lisci dell'esofago e, poiché la muscolatura esofagea è identica a quella faringea, la stessa onda peristaltica permette la propulsione del bolo prima nell'esofago e poi nello stomaco (in quest'ultimo caso la peristalsi viene definita secondaria).

In certi casi, come ad esempio soggetti affetti da cancro all'esofago, è frequente la manifestazione di disturbi deglutitori tali da non permettere il proseguimento del bolo nel lume esofageo o nello stomaco; tale disturbo viene definito disfagia esofagea.

Fase gastrica. Viene presentata come la fase conclusiva della deglutizione poiché il bolo oltrepassando lo sfintere esofageo inferiore entra nello stomaco per essere sottoposto al processo digestivo. Durante la digestione si ha una notevole attività da parte della muscolatura liscia e un'elevata secrezione di enzimi digestivi.

2.2.2 Reciprocità tra processo orale e percezione della texture

Il processo orale gioca un ruolo chiave nella percezione della texture degli alimenti introdotti e allo stesso tempo la percezione sensoriale della texture degli alimenti gioca un ruolo chiave nel processo orale (Panouille´ M., 2016). Il meccanismo con cui la struttura dell'alimento viene disaggregata e idratata con la saliva determina il rilascio di numerosi stimoli chimico-fisici (tattili, visivi, olfattivi e gustativi), responsabili delle sensazioni e della percezione soggettiva della texture, del sapore e dell'aroma (Foegeding E.A., 2015); (Tournier C., 2013). Dopo le fasi preliminari di captazione, traduzione e propagazione dello stimolo fisico attraverso le vie neurali afferenti del sistema nervoso centrale presenti nella cavità orale (meccanorecettori presenti nella lingua, nel legamento parodontale, nel palato e nelle gengive (Haggard & Boer, 2014) si verifica la registrazione e la elaborazione psicologica della sensazione in specifiche aree funzionali dell'encefalo.

Alla fase di elaborazione psicologica, segue una fase di risposta fisiologica che, attraverso le vie neurali efferenti, determina il comportamento delle strutture bersaglio coinvolte nella gestione del processo orale, regolandone la loro attività. Questa continua regolazione permette la percezione costante durante tutto il processo orale delle proprietà meccaniche

del bolo permettono la modulazione della frequenza, velocità, ampiezza dei movimenti compiuti dalla mandibola, tempo di elaborazione orale e grado di lubrificazione.

In un individuo sano, l'abilità di deglutire il bolo dipende dal raggiungimento di livelli critici di alcune proprietà fisiche, reologiche così come dall'abilità di percepire la condizione di confort orale, consentita dai meccanorecettori localizzati nella cavità orale e lungo il tratto orofaringeo, prima di intraprendere le corrette decisioni (volontarie e involontarie) e innescare in sicurezza il transito attraverso il cavo oro-faringeo ed esofageo verso lo stomaco (Tabella 9 e 10).

Secondo (Haggard & Boer, 2014) i meccanocettori trasmettono informazioni indotte da eventi meccanici quali tocco, pressione, vibrazione e propriocezione. Essi possono essere classificati in base alla loro morfologia e alla risposta delle fibre afferenti, associata alla stimolazione continua (Figura 8). Le fibre a lento adattamento (SAI, SAII) mostrano una scarica persistente in risposta a uno stimolo meccanico statico. Le fibre a rapido adattamento (RAI, RAI) mostrano solo una risposta iniziale all'esordio dello stimolo (Haggard & Boer, 2014), come descritto dalla tabella 11.

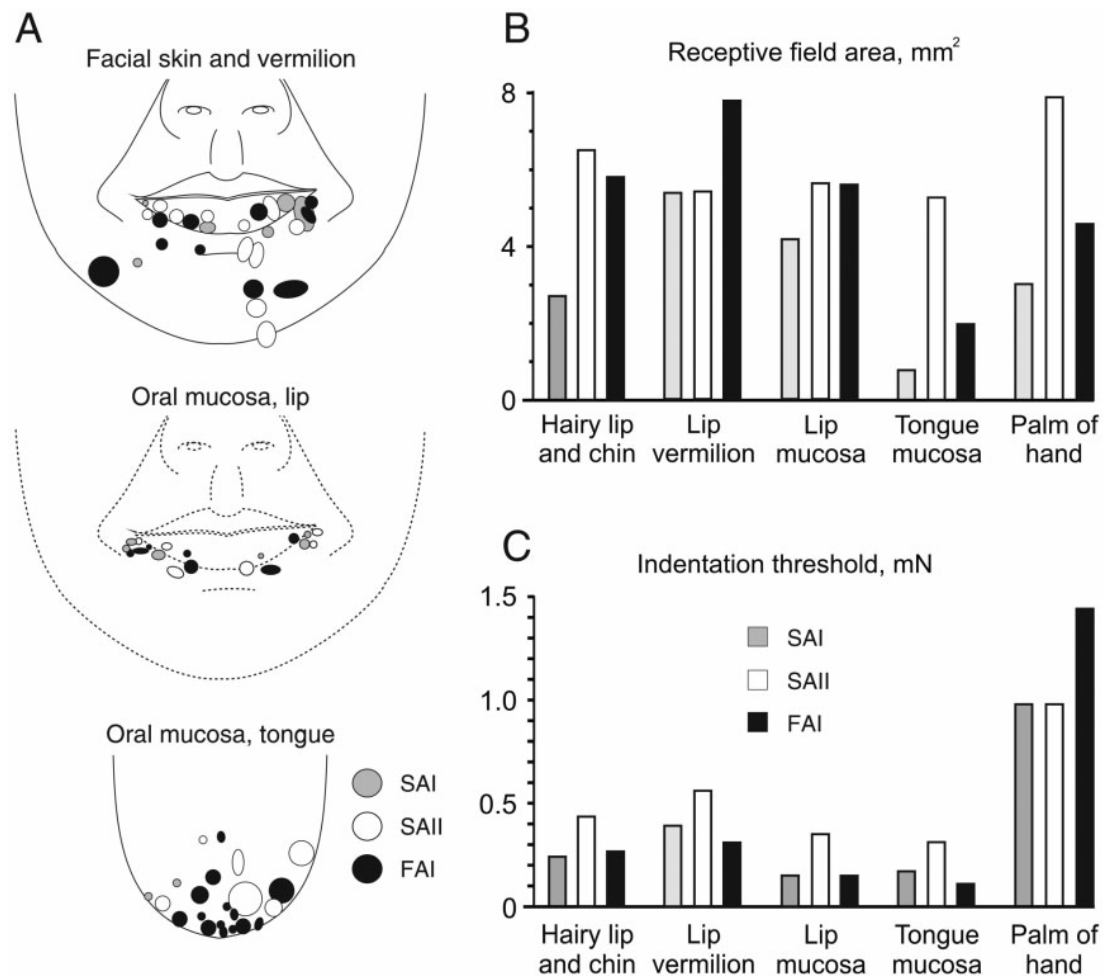


Figura 8 Meccanorecettori e loro distribuzione all'interno della cavità orale

Reference	Bolus Transit Velocity	Comments
<i>A) Pharyngeal phase</i>		
	cm/s	
Nguyen et al. ⁹	37.1 ± 1.1	Bolus head traversing the pharyngeal region. Data from Multiple Intraluminal Impedance (MII)
	28.3 ± 2.1	Bolus head velocity decreases as viscosity increases
	9.6 ± 1.0	Mean pharyngeal propulsion velocity of bolus body
Williams et al. ¹⁰	42	Bolus head entering into the UES. Data from high-resolution manometry
Bardan et al. ¹¹	37.6 ± 8.1	Bolus head traversing the pharyngeal region. Data from videofluoroscopy
	10.3 ± 3.0	Bolus tail average velocity as it traversed the pharynx and passed through the UES
Reference	<i>Bolus Transit Velocity</i>	<i>Comments</i>
<i>B) Esophageal phase</i>		
	cm/s	
Nguyen et al. ⁹	9.6 ± 1.4	Head liquid bolus (low viscosity); subjects in supine position. Data from MII
	14.2 ± 2.2	Head liquid bolus (low viscosity); subjects in upright position
	6.3 ± 0.8	Head high viscosity bolus (yogurt); subjects in supine position
	5.0 ± 0.4	Body liquid bolus (low viscosity); subjects in supine position
	5.2 ± 0.8	Body liquid bolus (low viscosity); subjects in upright position
	4.0 ± 0.2	Body high viscosity bolus (yogurt); subjects in supine position
	4.1 ± 0.1	Tail liquid bolus (low viscosity); subjects in supine position
	4.7 ± 0.2	Tail liquid bolus (low viscosity); subjects in upright position
	4.1 ± 0.2	Tail high viscosity bolus (yogurt); subjects in supine position

Tabella 9 Alcuni dati cinematici sul transito del bolo

Swallowing Phase	Liquid Bolus kinematic velocity, V^c (cm/s)	Estimated Shear rate, $\dot{\gamma}^d$ (1/s)
Pharyngeal <i>bolus head (max)</i> ^a	35.5	931.7
<i>bolus tail (average)</i> ^a	10	262
Esophageal <i>from Bolus Transit Time (BTT = 6.12 s)</i> ^b	2.94	4.7

^a Anatomy – Data from Battagel et al.¹⁴

^b Data based on Multichannel Intraluminal Impedance (MII) from Srinivasan et al.¹⁵

^c Kinematics – Data from Bardan et al.¹¹

^d From capillary and peristaltic flow equations

Tabella 10 Velocità di transito del bolo e relativa stima gradienti di velocità

Class	Percept or sensation
SAI	Roughness (Blake <i>et al.</i> 1997) Softness (Srinivasan and LaMotte 1996) Pressure (Trulsson and Essick 2010)
SAII	<i>No clear association</i> (Macefield, Gandevia and Burke 1990)
RAI	Weak, inverse roughness (Blake <i>et al.</i> 1997)
RAII (not present in oral tissues)	Roughness of fine surfaces (Bensmaïa and Hollins 2005; Gescheider, Bolanowski, Greenfield and Brunette 2005)

Tabella 11 Proprietà della texture percepite dai meccanorecettori

Meccanorecettori della lingua. Diversi tipi di meccanocettori si trovano dispersi nella lingua a livello profondo e superficiale (Haggard & Boer, 2014). I meccanorecettori superficiali svolgono attività sensoriali a rapido adattamento. Si ritiene che la superficie sensoriale della lingua abbia un ruolo specifico nell'esplorazione tattile esteroceettiva (superficiale) degli alimenti nella bocca (Haggard & Boer, 2014).

Meccanorecettori del legamento parodontale. Il legamento parodontale, che permette l'attacco dei denti agli alveoli delle arcate ossee superiore ed inferiore, è riccamente dotato di meccanorecettori che, attraverso il ganglio trigeminale, permettono la trasmissione degli stimoli al tronco cerebrale (Haggard & Boer, 2014). La funzione primaria di questi recettori sembra essere quella di regolare le forze applicate dai denti durante la fase di occlusione, masticazione e del primo morso (Haggard & Boer, 2014). Studi microneurografici hanno mostrato (i) che i tassi di stimolazione di questi recettori variavano fortemente con la direzione della forza applicata al dente e (ii) una maggiore sensibilità a bassi livelli di forza (Haggard & Boer, 2014). La risposta ai bassi livelli di forza potrebbe essere importante per la delicata manipolazione del cibo in bocca, mentre la risposta a livelli di forza più elevati potrebbe essere importante per le azioni più energiche richieste per la rottura al primo morso (Haggard & Boer, 2014).

Permettendo la percezione continua delle proprietà meccaniche del bolo, i meccanorecettori sono responsabili della modulazione dei fattori che controllano il processo orale inclusa la frequenza, velocità, ampiezza dei movimenti compiuti dalla mandibola, tempo di elaborazione orale e grado di lubrificazione. Affinché la deglutizione non rappresenti una problematica grave per la salute di un soggetto, è importante che l'abilità percettiva dei meccanorecettori non sia compromessa durante il processo orale.

Anche la composizione chimica e il contenuto di acqua dell'alimento giocano un ruolo attivo nel regolare le condizioni di sforzo o di deformazione da applicare nel processo orale, generando stimoli sensoriali di natura chimica. Ad esempio, la triturazione in bocca di mele e carote (alimenti con elevato contenuto di acqua) richiede l'applicazione di sforzi compressivi con movimenti verticali della mandibola. Anche la triturazione di biscotti secchi (a basso contenuto di acqua) richiede movimenti mandibolari verticali, ma solo nelle prime fasi della sequenza masticatoria. Infatti, per gli effetti idratanti ed enzimatici della saliva sui componenti amidacei, la struttura del biscotto subisce una transizione dallo stato solido fragile allo stato semi-solido e poi semi-liquido, per il quale sono sufficienti sforzi tangenziali (Foster, et al., 2010).

Relativamente al controllo fisiologico del processo masticatorio per individui sani, (Foster, et al., 2006) hanno proposto un duplice meccanismo di regolazione. Il primo meccanismo sembra essere legato alla memorizzazione a livello della corteccia cerebrale (*cortical-brain stem mechanis*) di una sequenza masticatoria adatta per l'alimento introdotto. Questo meccanismo è innescato da stimoli fisici ed è influenzato dalla conoscenza pregressa (pregiudizio) dell'alimento. Il secondo meccanismo sembra essere legato alla zona tronco encefalica (*brain-stem mechanism*) ed è attivato dai feedback sensoriali indotti dalla percezione psicofisica delle proprietà reologiche dell'alimento, che ne determinano una reazione di compensazione dinamica (alimentare non pianificata) del carico che deve essere applicato per superare le variazioni di resistenza dell'alimento e preparare un bolo adatto alla deglutizione. Le variazioni del comportamento reologico dell'alimento durante il processo masticatorio, si riflettono nella variazione della distribuzione dei tempi rilassamento strutturale, richiedendo adattamenti continui della modulazione degli sforzi e delle deformazioni applicate al fine di disgregare sia le diverse strutture sovra-molecolari preesistenti sia quelle che originano durante il processo di preparazione del bolo.

Tuttavia, è ragionevole ipotizzare che il controllo fisiologico della masticazione a partire dal primo morso in poi sia basato su meccanismi più complessi di quanto semplificati in letteratura. Come suggerito da (Agrawal, 1999), la frattura meccanica degli alimenti solidi friabili è strettamente dipendente dalla deformazione (strain) piuttosto che dagli sforzi (stress) applicati. Di conseguenza, l'applicazione di una deformazione durante la sequenza masticatoria richiede la modulazione dinamica della velocità di spostamento del punto di applicazione della forza nei cicli di carico/scarico (*strain-controlled mechanism*), in funzione dalla resistenza meccanica dell'alimento. Quando, invece, la frattura di un alimento solido dipende prevalentemente dalla necessità di superare uno sforzo critico (come nel caso di alimenti solidi fragili), l'applicazione degli sforzi richiede la modulazione dinamica della velocità di applicazione dello sforzo (*stress-controlled mechanism*), in funzione dalla resistenza meccanica dell'alimento.

La perdita parziale o totale della capacità di controllo fisiologico sulla velocità di spostamento del punto di applicazione della forza, oppure della capacità di controllare la velocità di applicazione degli sforzi, lascia ipotizzare conseguenze negative sia in termini di efficacia della masticazione sia in termini di sicurezza e salute del cavo orale e dell'individuo. D'altra parte, l'ambiente confinato (cavo orale) in cui si realizza la masticazione, infatti, impone limiti non solo sulle forze ma anche sulle deformazioni possibili, richiedendo la simultaneità dei relativi meccanismi di controllo fisiologico. Tale

controllo deve essere eseguito prima ancora di conoscere la reale resistenza meccanica dell'alimento, solo in funzione del grado di familiarità (pregiudizio), probabilmente richiedendo l'attivazione del meccanismo di regolazione della componente anticipatoria della forza o della deformazione da applicare. Durante le successive sequenze di masticazione, il controllo sulle forze o sulle deformazioni da applicare è una risposta alla percezione reale delle proprietà reologiche del bolo.

La percezione sensoriale durante il processo orale è fortemente influenzata non solo dalle proprietà meccaniche e reologiche dell'alimento/bolo ma anche da fattori interindividuali (età, sesso, stato di dentizione, fisiologia e comportamento masticatorio, soglie percettive) e da fattori ambientali (variazioni di temperatura). *L'età* ha impatto sul comportamento masticatorio manifestandosi attraverso la perdita di sensibilità al gusto, all'olfatto e agli stimoli in generale (Lavergne, et al., 2016) (Wang & Chen, 2016) e la riduzione del tono muscolare. (Kohyama, et al., 2003) servendosi dell'elettromiografia, hanno dimostrato che i soggetti anziani applicano meno forza per masticare e attuano più cicli di masticazione rispetto ai soggetti più giovani. Laguna et al hanno studiato la relazione tra le misure fisiche (forza applicata durante il morso; forza di presa della mano; pressione della lingua) e la difficoltà al consumo in un gruppo di anziani senza patologie. I risultati hanno dimostrato una relazione lineare ($r = 0,729$) tra le misure delle forze di frattura e la difficoltà percepita durante il tempo di elaborazione orale. (Marie-Agne`s Peyron, 2004) hanno mostrato che l'aumento di un anno di età comporta un aumento medio di 0,3 cicli per ogni sequenza masticatoria. (Kohyama, et al., 2007) hanno evidenziato che, per qualunque tipo di cibo, gli anziani producevano un'attività muscolare mandibolare inferiore rispetto ai giovani.

È stato dimostrato che soggetti con meno di 13 denti hanno difficoltà nella preparazione orale quindi sono più facilmente soggetti a disturbi della deglutizione (disfagia). Inoltre, gli individui che indossano protesi hanno minor difficoltà nel formare il bolo ma la loro esperienza orale risulta diversa poiché si ha scarsa sensibilità a vibrazione, forza e pressione (Cichero, et al., 2013); (Devezeaux de, et al., 2016).

Le differenze interindividuali interessano anche la secrezione di saliva. Questa infatti sia da un punto di vista compositivo che quantitativo varia tra diversi soggetti a seconda del tipo e grandezza delle ghiandole secretorie, dalla durata e dalla tipologia degli stimoli, dalla dieta, dallo stato di salute, dall'età e dal sesso (Mosca & Chen, 2016).

Le variazioni di temperatura durante il consumo di alcuni alimenti (come ad esempio gelato e cioccolato) comportano una transizione di fase da solido a liquido che risulta nell'aumento della lubrificazione del bolo e della cremosità percepita (Devezeaux de, et al., 2016)

2.2.3 Ruolo delle proprietà di frattura degli alimenti solidi

Il primo morso è semplicisticamente considerato come atto singolo di rottura fisica dell'alimento appena introdotto. In funzione dei movimenti compiuti dalla mandibola, il primo morso può essere approssimativamente suddiviso in tre fasi distinte, chiamate rispettivamente apertura rapida, chiusura rapida e chiusura lenta (Figura 9).

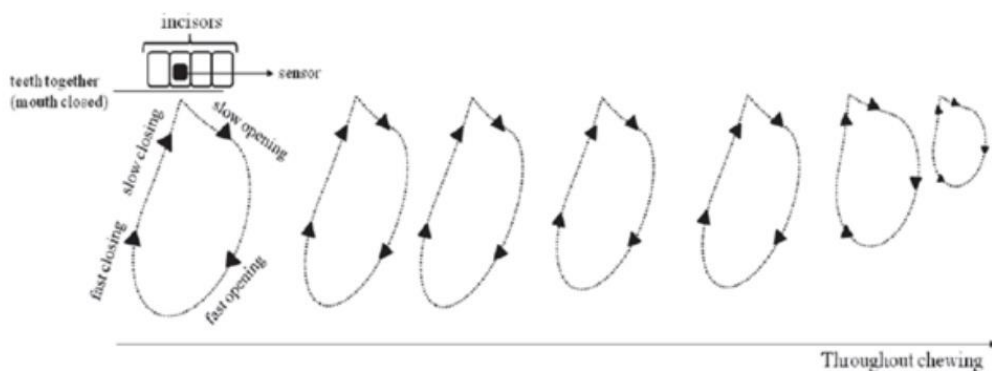


Figura 9 *Movimenti della mandibola al primo morso e durante la masticazione*

La forza applicata durante il primo morso aumenta con la resistenza meccanica dell'alimento introdotto. Questa relazione è stata ampiamente dimostrata dagli studi condotti da (Mioche, et al., 1995). Utilizzando una cella di carico intraorale, questi autori hanno misurato la forza del primo morso applicata in condizioni cicliche a diversi alimenti modello con comportamento meccanico a prevalente risposta elastica, plastica e friabile (Figura 10).

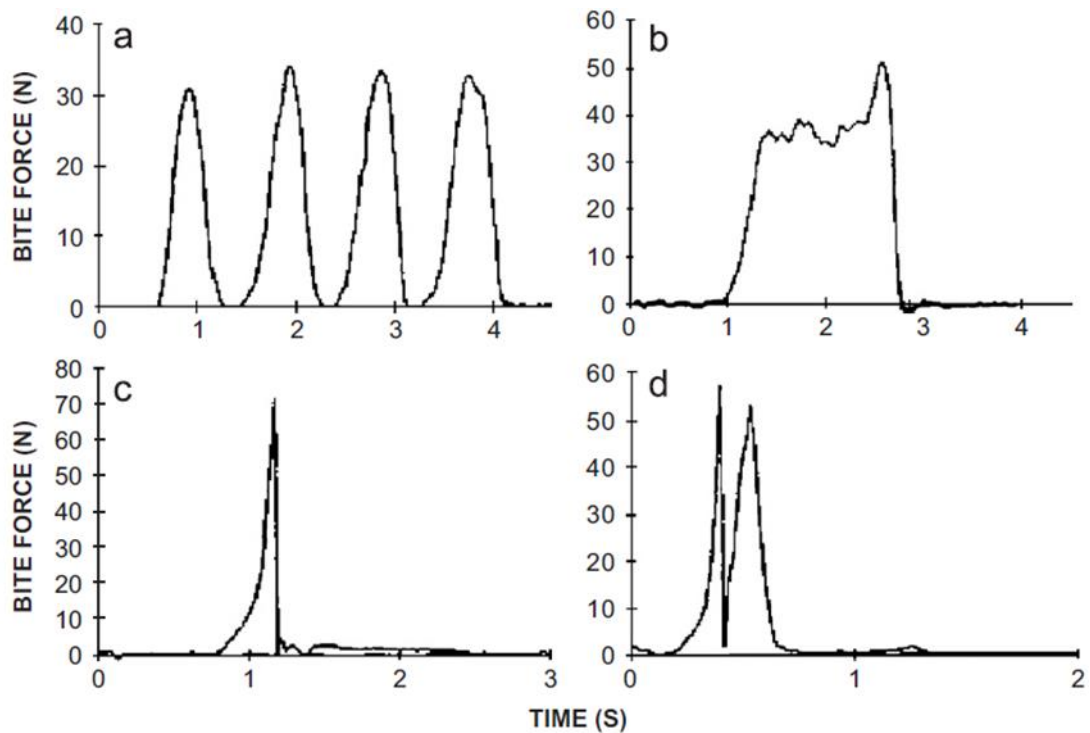


Figura 10 Forza mordente (*biting*) in diversi alimenti modello: (a) elastico, (b) plastico, (c e d) friabile.

Come si può evincere dalla figura, un campione elastico sottoposto a cicli di compressione genera una simmetria nella forza applicata. In ciascun ciclo, infatti, si raggiunge mediamente lo stesso valore massimo legato alla resistenza strutturale, senza che il campione abbia subito frattura o deformazioni irreversibili. Sotto il profilo sensoriale, un alimento con comportamento elastico potrebbe risultare di difficile elaborazione (Chen, 2007). Nel caso invece di un materiale plastico, Figura 10b, la forza mordente raggiunge una soglia sopra la quale il materiale subisce dapprima una deformazione plastica (irreversibile), per poi subire uno snervamento (*Yield point*) prima di raggiungere il limite massimo di resistenza meccanica quando si formano e propagano microfessure. Per effetto della deformazione plastica, tali microfessure possono chiudersi comportando un aumento della resistenza meccanica, richiedendo l'applicazione di una forza mordente ancora superiore prima di raggiungere il limite massimo che precede la destrutturazione macroscopica. Alimenti di questo tipo richiedono un tempo di *biting* maggiore rispetto ai quelli con comportamento elastico (Chen, 2007). Per i prodotti friabili, invece, il ciclo di *biting* è più breve a causa della fragilità della microstruttura (Figura 10c, d).

La natura chimica e il livello di interazione dei costituenti dell'alimento ne determinano le sue proprietà macroscopiche in termini di prevalenza tra componenti elastiche e plastiche.

Tuttavia, anche la geometria dell'alimento introdotto ne influenza la resistenza meccanica durante il processo orale. Utilizzando un sensore multiplo per misurare in tempo reale la forza mordente e l'area di contatto, (Kohyama, et al., 2005) hanno stimato lo sforzo richiesto durante il primo morso di alimenti con diversa struttura e resistenza meccanica. Questi autori hanno evidenziato che negli alimenti duri e fragili (carote), il picco della forza esercitata, l'area di contatto e lo sforzo massimo nel punto di frattura erano più grandi con l'aumento dello spessore. Anche negli alimenti morbidi e resistenti (gel di pesce), il picco massimo della forza e l'area di contatto sono aumentati in concomitanza ad aumento dello spessore, ma lo sforzo massimo ne è indipendente. (Agrawal & Lucas, 2003) ritengono che il ruolo della geometria durante il primo morso può essere relazionato al lavoro meccanico svolto piuttosto che all'intensità della forza mordente. Nei loro studi evidenziarono che un alimento di resistenza relativamente elevata presentava un'area di sezione maggiore durante il primo morso e per tale motivo richiedeva un maggior lavoro per provocarne la frattura. Sebbene sia chiaro che forza e lavoro alla rottura sono due distinte proprietà materiali, non è ancora chiaro se la percezione sensoriale della durezza sia basata sulla forza applicata o sul lavoro svolto o perfino sulla potenza (Chen, 2007).

L'attività fisiologica muscolare attivata durante il primo morso è influenzata dalle proprietà di struttura e meccaniche della matrice alimentare così come dalla percezione sensoriale delle stesse (Van der Bilt, 2006). Questi autori ritengono che la forza applicata al primo morso possa essere costituita da una "componente anticipazione" e da una "componente di induzione periferica" (Van der Bilt, 2006). Attraverso il monitoraggio dei movimenti della mandibola e dell'attività muscolare prima e durante l'introduzione di un alimento in bocca, questi autori hanno dimostrato che la componente anticipatoria inizia molto prima dell'introduzione del cibo per effetto di una stima sulla resistenza meccanica percepita alla vista, mentre la componente di induzione periferica segue immediatamente la prima (23ms dopo l'introduzione del cibo) solo in risposta alla effettiva resistenza meccanica percepita durante il primo morso. Questa seconda componente è responsabile di circa l'85% dell'attività muscolare richiesta per superare la resistenza alla frattura dell'alimento. La velocità di applicazione della forza durante il primo morso è un altro aspetto importante del processo orale. È stato osservato, infatti, che un aumento della velocità di masticazione fa diminuire la componente di induzione periferica. Anche la velocità di masticazione è determinata dagli aspetti fisiologici e dalle proprietà meccaniche dell'alimento. (Mioche, et al., 1995) hanno osservato che la velocità del primo morso dipende dalla deformabilità, scorrevolezza, e fratturabilità dell'alimento introdotto. (Meullenet, 2002) hanno evidenziato

che la velocità del primo morso può avere un'ampia variabilità che dipende maggiormente dal soggetto piuttosto che dall'alimento, registrando velocità comprese tra 16,6mm/s e 39,0mm/s relativamente al consumo di formaggi. Tuttavia, non è ancora stato chiarito quale meccanismo permette l'arresto di un morso allo scopo di evitare la collisione tra i denti, specialmente quando si verifica una rapida diminuzione della resistenza meccanica. È stato ipotizzato il ruolo di un riflesso fisiologico in grado di indurre lo scarico della forza applicata (*unloading reflex*) che permette la decelerazione rapida della masticazione (Bosman, 2004). A livello sensoriale, il primo morso genera un elevato numero di stimoli fisici legati alle caratteristiche meccaniche e percepite come attributi della texture quali durezza, deformabilità, croccantezza, sonorità, ecc.

All'inizio della sequenza masticatoria l'attributo della texture maggiormente percepita è la durezza. Alcuni autori hanno definito la durezza come “*forza richiesta per comprimere l'alimento tra i denti*” e allo stesso tempo hanno rilevato una elevata correlazione con le proprietà di resistenza alla frattura meccanica quali il modulo elastico, fattore di concentrazione degli sforzi intorno all'apice di una fessura, stress alla frattura (Kim E-J., 2011). I risultati di questo studio hanno dimostrato che il processo dominante durante il primo morso è l'innesco alla frattura (Figura 11), rappresentato dal fattore di concentrazione degli sforzi (*critical stress intensity factor*, K_{IC}).

Durante il primo morso, la durezza è spesso associata alla croccantezza, un attributo della texture che si riferisce all'emissione acustica prodotta all'innesco della frattura (Spence, 2015). Durezza e croccantezza sono correlati allo sforzo richiesto per propagare la frattura [Vicent et al (2002); (Kim E-J., 2011)].

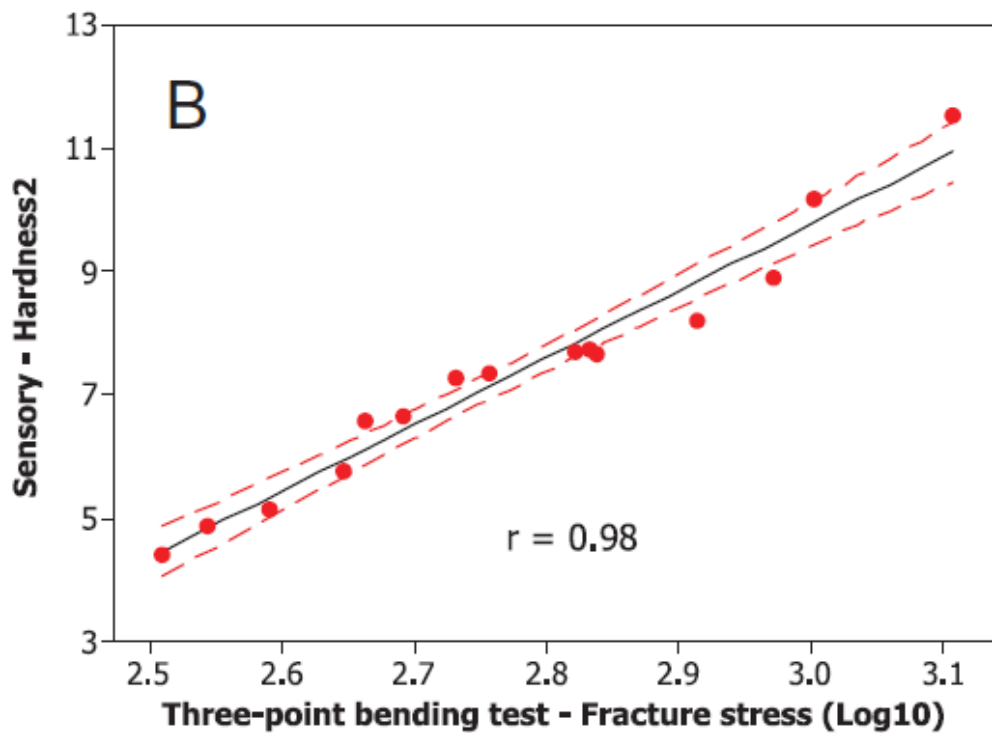
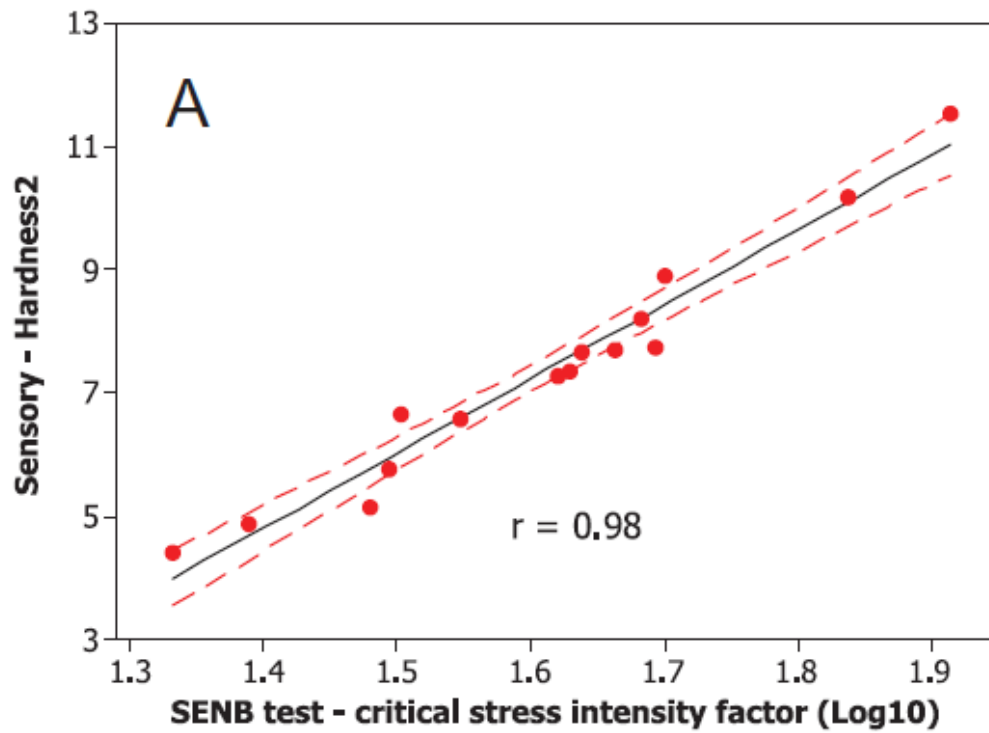


Figura 11 Relazione tra durezza percepita e proprietà di frattura misurata strumentalmente con il metodo di flessione a tre punti

2.2.4 Ruolo delle proprietà reologiche - alimenti semi-solidi e liquidi

Il processo orale implica meccanismi sia di natura fisica modulati dalle proprietà reologiche sia di natura fisiologica controllati dal sistema nervoso centrale, quali l'istinto psicoreologico e psicometrico nella percezione della texture.

La reologia è la scienza che studia lo scorrimento e la deformazione dei materiali attraverso le tecniche di reometria e che permette di quantificare le relazioni su scala macroscopica tra forza, deformazione e tempo di rilassamento della struttura attraverso un gran numero di descrittori legati alla composizione e alla struttura del materiale (proprietà reologiche). Gli attributi della texture possono essere valutati qualitativamente e quantitativamente sia attraverso l'analisi sensoriale (psicoreologia) sia attraverso l'analisi meccanica e reologica (reometria). L'analisi sensoriale di un alimento è la disciplina scientifica che studia l'istinto comportamentale della percezione, apprendimento, e riconoscimento psicologico degli stimoli generati dalla esposizione dei sensi umani alla struttura degli alimenti e del bolo. La psicoreologia qualitativa si interessa agli attributi a cui l'individuo può essere sensibile, alla struttura mentale del lessico dei descrittori della texture e al raggruppamento dei descrittori simili. La psicoreologia quantitativa (psicrometria) si interessa alle relazioni matematiche tra coppie di descrittori di texture o a funzioni più complesse che legano diverse proprietà di texture, attraverso la registrazione di dati sperimentali sull'intensità dello stimolo e sull'intensità della percezione sensoriale dello stimolo stesso.

Alcuni autori hanno proposto un'utile codifica di alcune proprietà meccaniche/reologiche misurate strumentalmente sottospecifiche condizioni di sollecitazione esterna e i corrispondenti attributi percepiti sensorialmente (texture) (Civille & Szczesniak, 1973). Nella Tabella 12 sono elencati gli attributi primari della texture (durezza, coesività, viscosità, resilienza, adesività) e quelli derivati o secondari (fratturabilità, masticabilità, gommosità).

	Physical	Sensory
<i>Primary properties</i>		
Hardness	Force necessary to attain a given deformation	Force required to compress a substance between molar teeth (in the case of solids) or between tongue and palate (in the case of semi-solids).
Cohesiveness	Extent to which a material can be deformed before it ruptures.	Degree to which a substance is compressed between the teeth before it breaks.
Viscosity	Rate of flow per unit force.	Force required to draw a liquid from a spoon over the tongue.
Springiness	Rate at which a deformed material goes back to its undeformed condition after the deforming force is removed	Degree to which a product returns to its original shape once it has been compressed between the teeth
Adhesiveness	Work necessary to overcome the attractive forces between the surface of the food and the surface of the other materials with which the food comes in contact.	Force required to remove the material that adheres to the mouth (generally the palate) during the normal eating process.
<i>Secondary properties</i>		
Fracturability	Force with which a material fractures: a product of high degree of hardness and low degree of cohesiveness.	Force with which a sample crumbles, cracks, or shatters.
Chewiness	Energy required to masticate a solid food to a state ready for swallowing: a product of hardness, cohesiveness and springiness	Length of time (in sec) required to masticate the sample, at a constant rate of force application, to reduce it to a consistency suitable for swallowing.
Gumminess	Energy required to disintegrate a semi-solid food to a state ready for swallowing: a product of a low degree of hardness and a high degree of cohesiveness.	Denseness that persists throughout mastication; energy required to disintegrate a semi-solid food to a state ready for swallowing.
<small>^a Cville and Szczesniak, 1973. By permission of the Food and Nutrition Press, Inc.</small>		

Tabella 12 Codifica di corrispondenza fisica e sensoriale tra proprietà meccaniche/reologiche e attributi della texture

La masticazione successiva al primo morso è la principale operazione orale alla quale vengono sottoposti gli alimenti solidi e semisolidi. Il bisogno di masticare può essere spiegato da due motivi. Il primo è quello di rendere piccole abbastanza le particelle di alimento così da poter aumentare sufficientemente il rapporto superficie/volume e massimizzare l'operazione di mescolamento e lubrificazione con la saliva per formare un bolo coesivo e confortevole alla deglutizione. Il secondo motivo è inerente alla possibilità di aumentare la capacità di apprezzamento del gusto e dell'aroma tipici di un alimento.

La masticazione richiede un complesso controllo fisiologico esercitato in modo continuo e dinamico sui movimenti verticali e orizzontali della mandibola durante l'elaborazione orale. Questi movimenti sono necessari all'applicazione di sforzi e deformazioni verticali e tangenziali che, a loro volta, consentono la progressiva disgregazione della struttura originaria dell'alimento, la sua maggiore esposizione all'azione della saliva e la formazione del bolo. In generale, la masticazione di alimenti con struttura solida prevalentemente elastica richiede l'applicazione di sforzi principalmente compressivi che superino la resistenza meccanica alla frattura. Gli alimenti semi-solidi, semi-liquidi e liquidi, invece, richiedono l'applicazione di sforzi principalmente di taglio in grado di superare la resistenza alla deformazione o allo scorrimento.

La natura adattiva dei meccanismi fisiologici di controllo sul processo di masticazione in funzione dell'evoluzione della struttura del bolo è ampiamente documentata in letteratura scientifica. Le principali caratteristiche della sequenza masticatoria, cioè la durata, il numero di cicli, l'attività EMG per sequenza e per ciclo aumentano significativamente con la durezza dell'alimento introdotto (Foster, et al., 2006). Questi autori hanno valutato quantitativamente i parametri caratteristici della sequenza masticatoria durante la masticazione di alimenti elastici e di alimenti plastici. La durezza di questi alimenti è stata valutata sensorialmente utilizzando una scala non strutturata e strumentalmente in termini di forza massima raggiunta durante un ciclo di compressione/decompressione. I risultati hanno evidenziato in particolare che la velocità di apertura mandibolare diminuisce in modo scalare con l'aumento della durezza quando si masticano alimenti elastici. Non è stata osservata la stessa relazione per alimenti plastici, sebbene questi si distinguono dagli altri in modo statisticamente significativo. Al contrario, la durata di apertura/chiusura mandibolare (ma non la durata occlusale) aumenta di almeno tre volte con la durezza quando si masticano alimenti plastici rispetto agli alimenti elastici. L'ampiezza dei movimenti mandibolari verticali aumenta con la durezza quando si mastica alimenti sia elastici che plastici; tuttavia non si osservano variazioni significative nell'ampiezza dei movimenti mandibolari orizzontali. La frequenza

masticatoria osservata durante le fasi successive al primo morso è stata messa meglio in relazione alle variazioni dinamiche delle proprietà reologiche dell'alimento.

(Engelen, et al., 2005) hanno misurato i parametri caratteristici della sequenza di masticazione di diversi prodotti per i quali hanno anche determinato le proprietà meccaniche, nello specifico la forza minima richiesta per lo scorrimento (*Yield load*). Somministrando un volume fisso (10 cm³) di toast, torta, formaggio ed arachidi a 266 soggetti in salute di età compresa tra 30 e 54 anni, gli autori hanno evidenziato una relazione lineare tra *Yield load* e numero di cicli masticatori (Figura 12).

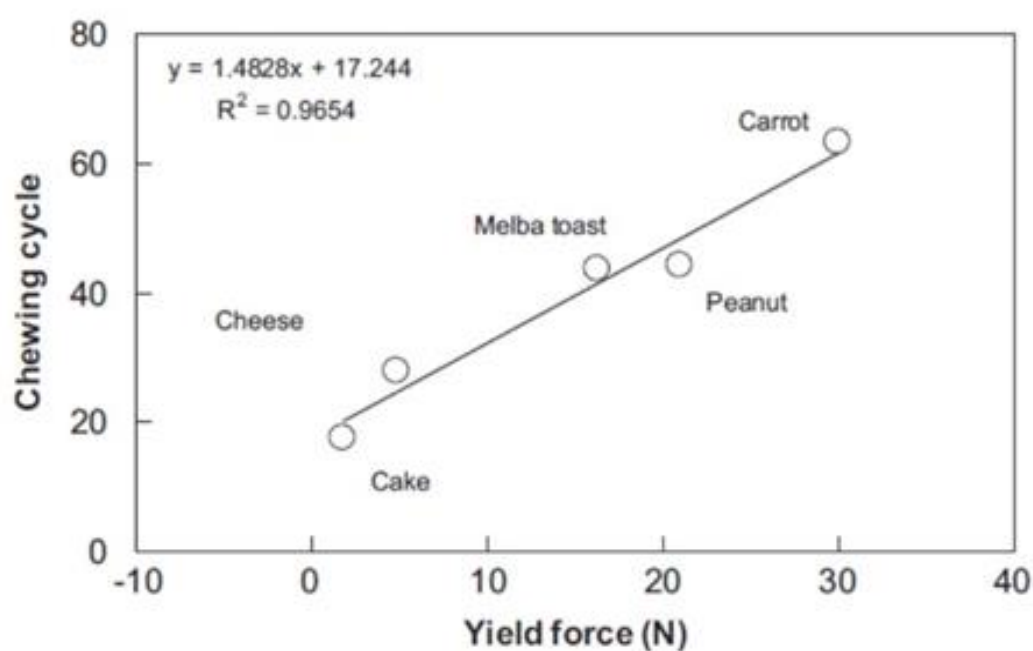


Figura 12: Relazione tra forza di compressione e numero di cicli masticatori Engelen et al. (2005)

Durante la masticazione la durezza continua ad essere percepita anche se, diversamente dal primo morso, non è più la sensazione dominante. Tale differenza nella percezione è dovuta alla differenza nella forza applicata e alla sensibilità degli incisivi e dei molari, ai cambiamenti reologici del bolo dovuti all'incorporamento di saliva, alla destrutturazione (Kim E-J., 2011).

Lo stress e la deformazione alla frattura influenzano la percezione degli attributi della texture durante la tarda masticazione (Devezeaux de, et al., 2016). Per esempio, gel caratterizzati da alta deformazione alla frattura e sono percepiti più lisci (*smoother*), con particelle più larghe e meno coesive. Gel con bassa deformazione alla frattura sono percepiti più polverosi e granulosi durante la masticazione e con un'alta frazione di residui dopo l'espulsione dalla

bocca. Gel con un elevato sforzo alla frattura sono percepiti più duri (*firm*) e meno spalmabili (*spreadable*) durante la masticazione. Gel caratterizzati da basso sforzo e alta deformazione alla frattura sono percepiti grassi (*fatty*), fondenti (*melting*), e cremosi (*creamy*) durante la masticazione. È importante notare che questi risultati confermano che lo stress da frattura influenza principalmente la percezione all'inizio mentre ha solo un leggero impatto sulla percezione della consistenza alla fine della elaborazione orale.

Un'approfondita e aggiornata analisi della letteratura scientifica disponibile su riviste referenziate ha permesso di sintetizzare i principali risultati degli studi focalizzati sulla relazione di causa-effetto tra proprietà reologiche dell'alimento e risposta fisiologica dell'individuo, semplificando l'intero processo orale nelle fasi che corrispondono alla sequenza di masticazione e a quella di deglutizione.

Durante la masticazione le proprietà percepite non riguardano solo ed unicamente l'alimento, ma il sistema saliva-alimento (Chen, 2014) (Mosca & Chen, 2016). La saliva influenza la percezione della texture sia da un punto di vista fisico, sia da un punto di vista biochimico portando al rilascio o alla formazione di nuove molecole [Mosca, Chen, 2016]. La saliva è coinvolta nei meccanismi di destabilizzazione colloidale delle emulsioni (*salt induced aggregation*, coalescenza, i meccanismi del *depletion flocculation* e del *bridging flocculation*) che porta alla formazione di una microstruttura diversa rispetto all'alimento di partenza. Se si considera ad esempio un'emulsione stabile, normalmente sarebbe percepita come uniformemente cremosa, al momento dell'elaborazione orale, invece, l'emulsione destabilizzata potrebbe essere percepita come ruvida e secca o addirittura grassa se c'è stata la coalescenza delle gocce di grasso (Chen, 2014). Un'altra azione destabilizzante della saliva riguarda l'interazione tra alcune proteine salivari e altre molecole, come ad esempio i polifenoli, contenuti in un alimento (Chen, 2014). Tali interazioni sono alla base della percezione di astringenza che causa l'esaurimento delle proteine salivari dalle superfici orali e la significativa riduzione della lubrificazione orale (Chen, 2014). Anche l'attività amilolitica della saliva è importante ai fini della percezione sensoriale. Gli enzimi α -amilasi infatti a seguito della loro azione a livello orale, determinano una diminuzione della viscosità e un aumento della sensazione di dolce a seguito della produzione di molecole di glucosio. La riduzione della viscosità aumenta la lubrificazione del bolo e tale aspetto può essere tradotto come una sensazione di scioglievolezza in bocca (Devezeaux de, et al., 2016). È stato riscontrato che l'attività α -amilasica, nel caso di alimenti solidi e semisolidi, ha effetti anche sulla masticabilità (*mouthfeel*) e sugli attributi *after-feel* (Mosca & Chen, 2016).

Il processo dinamico della formazione del bolo può convenientemente essere schematizzato (Figura 13) in funzione dei principali meccanismi che cronologicamente comportano la progressiva modifica strutturale ed inglobamento della saliva, delle modifiche sensoriali percepite e variazioni registrate durante la masticazione (Witt T., 2015).

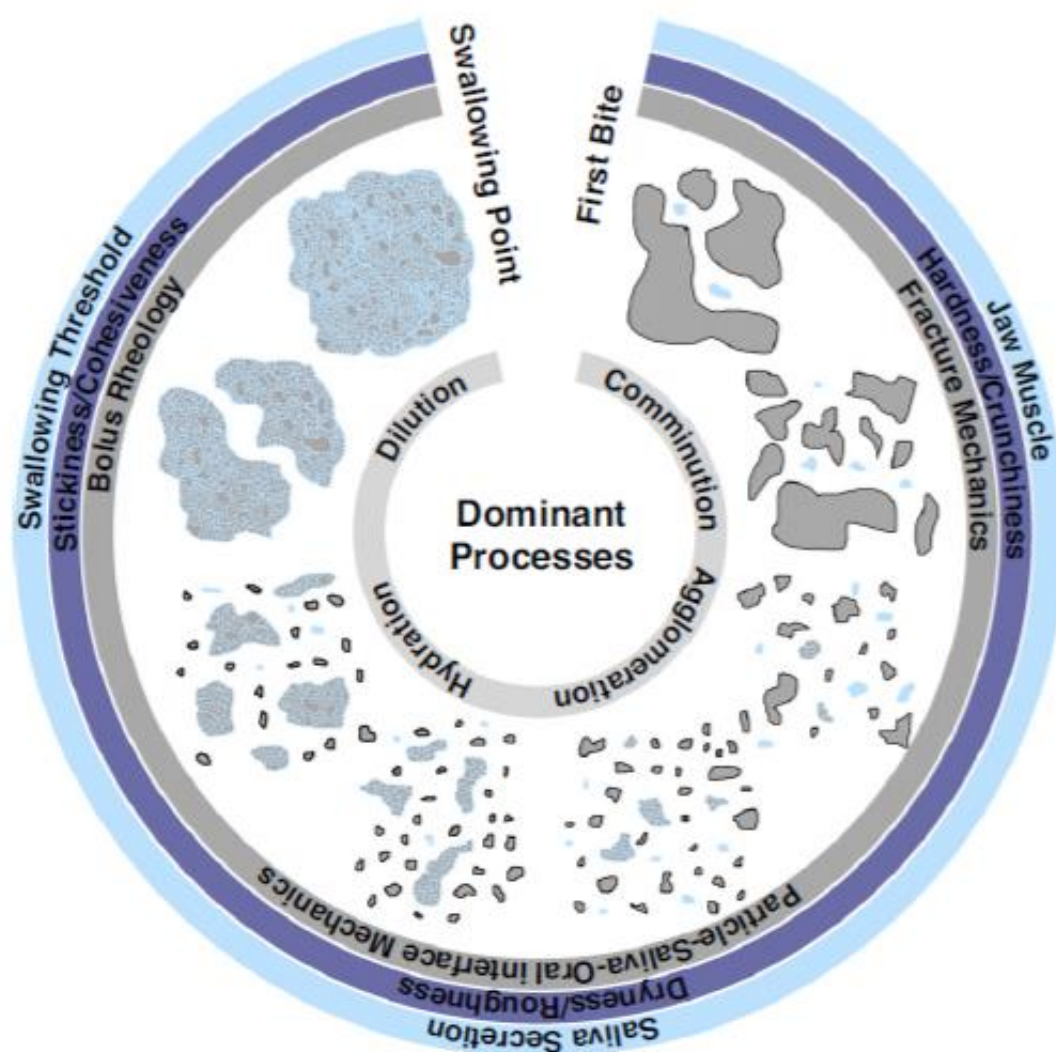


Figura 13 Meccanismi dominanti nel processo orale (Witt T., and Stokes 2015)

Nonostante siano stati condotti diversi studi mirati sulle relazioni esistenti tra proprietà reologiche e biomeccanica del processo orale, a oggi non è ancora disponibile in letteratura una review sistematica focalizzata su “ben definite” proprietà reologiche che svolgono un ruolo decisivo nel processo orale, texture sia in termini di efficacia nell’attivare il meccanismo della deglutizione [Gallegos et al., 2012] sia nella capacità di percezione della texture.

Per un individuo sano, l'abilità di deglutire il bolo dipende dal raggiungimento di livelli critici di alcune proprietà fisiche, reologiche così come dall'abilità di percepire la condizione di confort orale, consentita dai meccanorecettori localizzati nella cavità orale e lungo il tratto orofaringeo, prima di intraprendere le corrette decisioni (volontarie e involontarie) e innescare in sicurezza il transito attraverso il cavo oro-faringeo ed esofageo verso lo stomaco.

Gli studi scientifici degli ultimi 10 anni sulla fisiologia della deglutizione hanno confermato che il processo di deglutizione orofaringea può essere modulato volontariamente in risposta a diversi stimoli sensoriali (Steele & J., 2010). L'input sensoriale è vitale per la fase orale, faringea ed esofagea, così come la valutazione dell'integrità del percorso afferente che trasporta le informazioni al centro del controllo deglutitorio del cervello (Martin-Harris, et al., 2008). L'input sensoriale informa il sistema nervoso centrale sul processo masticatorio in atto allo scopo di realizzare un bolo adeguato e adattare le forze propulsive della lingua per garantirne il trasporto efficiente nella faringe. Hatchings e Lilliford proposero un modello di gestione del processo orale a tre variabili ideato per spiegare l'importanza della percezione della texture di un alimento durante il processo orale. Gli autori stabilirono che il bolo può essere deglutito in sicurezza qualora sia rispettata una condizione limite minima sia per il grado di frammentazione degli elementi semi-solidi che lo costituiscono sia per il livello di lubrificazione dovuto alla incorporazione di saliva o liquidi rilasciati per effetto di transizioni di fase o per effetto della espulsione di siero.

Per comprendere quali proprietà del bolo inneschino la deglutizione è indispensabile caratterizzare le forze messe in gioco nel cavo orale e le sue proprietà reologiche. Prinz e Lucas (1997) definirono un modello ottimale di deglutizione, proponendo la forza coesiva massima come criterio per innescare la deglutizione.

La forza coesiva (F_C) è una misura della coesione tra le particelle elementari che costituiscono il bolo ed è espressa dalla differenza tra la forza viscosa (F_V) e la forza di adesione (F_A). Nella descrizione matematica di questa teoria si assume che i frammenti che si formano a seguito della frattura e rottura dell'alimento, siano di forma sferica e che vengano ricoperte da saliva così da poter successivamente aggregarsi grazie alla sua tensione superficiale. La forza di adesione (F_A) è espressa dalla seguente formula:

$$F_A = 4\pi r\gamma$$

dove r è il raggio delle particelle sferiche (m), γ è la tensione superficiale della saliva all'interno del cavo orale (N/m), mediamente pari a 0.053 N/m.

Le forze attrattive tra le singole particelle possono essere valutate misurando le forze viscosse di separazione (F_v) necessarie per separarle:

$$F_v = \frac{3\pi\eta R^4}{64td^2}$$

dove η è la viscosità della saliva (Pas), R è il raggio del disco di bolo (m), t è il tempo di separazione delle particelle (s), d è la distanza media tra le particelle (m), γ è la tensione superficiale della saliva nel cavo orale (N/m).

Pertanto, l'aggregazione delle singole particelle può avvenire quando $F_v > F_A$. Il valore massimo della differenza tra la forza di separazione (F_v) delle particelle e quella di adesione (F_A) alle pareti della bocca, corrisponde al momento di innesco della deglutizione.

Per verificare la validità di questa ipotesi, (K.R.Agrawa, et al., 1997) hanno messo in relazione la forza coesiva responsabile della formazione del bolo con il numero di cicli masticatori compiuti durante il consumo di carote e noci brasiliane.

Durante le prime fasi di masticazione, la forza coesiva per entrambi gli alimenti era negativa. Con l'aumentare del numero di cicli compiuti, in concomitanza alla maggior secrezione di saliva e alla diminuzione del diametro delle particelle, la forza coesiva aumentava raggiungendo un valore massimo per entrambi gli alimenti in un intervallo intorno a 20 cicli masticatori. Se la masticazione viene protratta oltre tale frequenza, la continua secrezione di saliva causa una diluizione con eccessiva separazione delle particelle e una minore coesività del bolo. La teoria della forza coesiva massima descrive la formazione del bolo utilizzando un unico parametro misurabile, la forza coesiva, in funzione delle dimensioni delle particelle del bolo, la tensione superficiale e la viscosità della saliva. Tuttavia, l'ipotesi di questa teoria è stata messa in discussione soprattutto per il fatto che l'aumento della coesione del bolo rende difficile la sua deformazione e il suo scorrimento, aumentando l'energia muscolare richiesta per il raggiungimento delle caratteristiche reologiche ottimali.

In uno studio condotto da Young et al., (2015) è stato mostrato che non solo esistevano differenze interindividuali significative nello *Yield stress* (cioè lo sforzo al quale il bolo inizia a deformare) applicato nel cavo orale ma che tale proprietà diminuisce dai primi stadi della formazione del bolo al momento della deglutizione. Un andamento simile era osservato anche per la forza massima al primo ciclo di compressione. Una diminuzione della forza massima attraverso la masticazione è in accordo con la destrutturazione dell'alimento e con la diminuzione della sua durezza. L'adesività, intesa come il lavoro negativo richiesto per allontanare l'organo dello strumento dal campione dopo la prima compressione, aumentava durante il processo di formazione del bolo fin al momento della deglutizione. I fattori che

possono influenzare l'adesività meccanica sono la massa secca del bolo ed il contenuto di umidità: infatti, l'aumento di massa secca comporta un aumento nell'adesività, mentre un aumento dell'umidità ne determina una diminuzione. La coesività, intesa come il rapporto del lavoro svolto durante la prima e la seconda compressione, subiva un incremento durante il processo orale. Tale proprietà meccanica incrementa con l'umidità del bolo. Questi autori conclusero dichiarando che non c'è una soglia deglutitoria universale: la deglutizione dei boli è innescata quando lo *Yield stress* o altre proprietà reologiche raggiungono un valore critico, diverso per ciascun soggetto. Tuttavia, i soggetti consumatori possono essere potenzialmente raggruppati in base alle esperienze sensoriali e al percorso di destrutturazione dell'alimento introdotto, oppure alle proprietà del bolo.

L'estensibilità e la viscosità dei boli semi-solidi/liquidi rappresentano le proprietà reologiche più studiate per la loro influenza sull'innescamento della deglutizione determinando il tempo di residenza orale, tempo che intercorre dall'assunzione e la deglutizione, e la percezione del confort orale legato alla sensazione di facilità della deglutizione. L'estensibilità del bolo è legata alla sua capacità di deformarsi senza scorrere sotto l'effetto di una pressione e può essere stimata in condizioni non stazionarie misurando la forza massima esercitata o il lavoro svolto per la deformazione in condizioni di trazione o di compressione. L'estensibilità del bolo è una proprietà reologica cruciale nell'innescamento del riflesso deglutitorio soprattutto quando la percezione gustativa e olfattiva sono escluse. La *viscosità, intesa come resistenza allo scorrimento*, è misurata in condizioni stazionarie di sforzo di taglio. Se il bolo è facilmente estensibile e/o la viscosità è relativamente bassa, il tempo di residenza orale è breve; mentre se il bolo è relativamente resistente o relativamente viscoso richiederà un tempo di residenza orale più lungo e un maggiore lavoro di estensione per renderlo più confortevole alla deglutizione. Codificando la difficoltà alla deglutizione in termini sensoriali con una scala da 0 a 10, dove 0 indica la massima facilità di deglutizione (come nel caso di acqua) e 10 la massima difficoltà (come nel caso di alimenti solidi che richiedono la masticazione), (Chen & L., 2011) hanno osservato una relazione lineare tra tempo di residenza orale del bolo e sensazione di difficoltà nel deglutire. Tanto più alta è la sensazione di difficoltà nel deglutire più è lungo il tempo di permanenza del bolo nella cavità orale.

Chen e Lolivret (2010) hanno caratterizzato il comportamento reologico di alcuni boli sia in condizioni di scorrimento controllato utilizzando un reometro rotazionale, sia in condizioni di flusso estensionale (trazione) utilizzando un analizzatore meccanico universale. L'analisi reologica di boli modello ha permesso di misurare la viscosità apparente (*shear-rate*) durante

le prove di scorrimento. La viscosità misurata strumentalmente può essere messa in relazione alla resistenza allo scorrimento orale di un bolo semi-liquido o liquido attraverso il cavo oro-faringeo. L'analisi della texture dei boli semi-solidi ha permesso di misurare la forza massima e il lavoro compiuto durante l'estensione. La capacità di estensione di un bolo semi-solido misurata strumentalmente può essere messa in relazione a quella che subisce durante il transito faringeo ed esofageo (attivo per le peristalsi primarie e secondarie). I risultati hanno evidenziato una correlazione esponenziale (R^2 pari a 0,97) tra percezione sensoriale della difficoltà di deglutire e la viscosità stazionaria misurata alle seguenti velocità di flusso, $1s^{-1}$, $10s^{-1}$, $50s^{-1}$ e $100s^{-1}$, gradienti di velocità di scorrimento solitamente esplorati nel cavo orale (Figura 14).

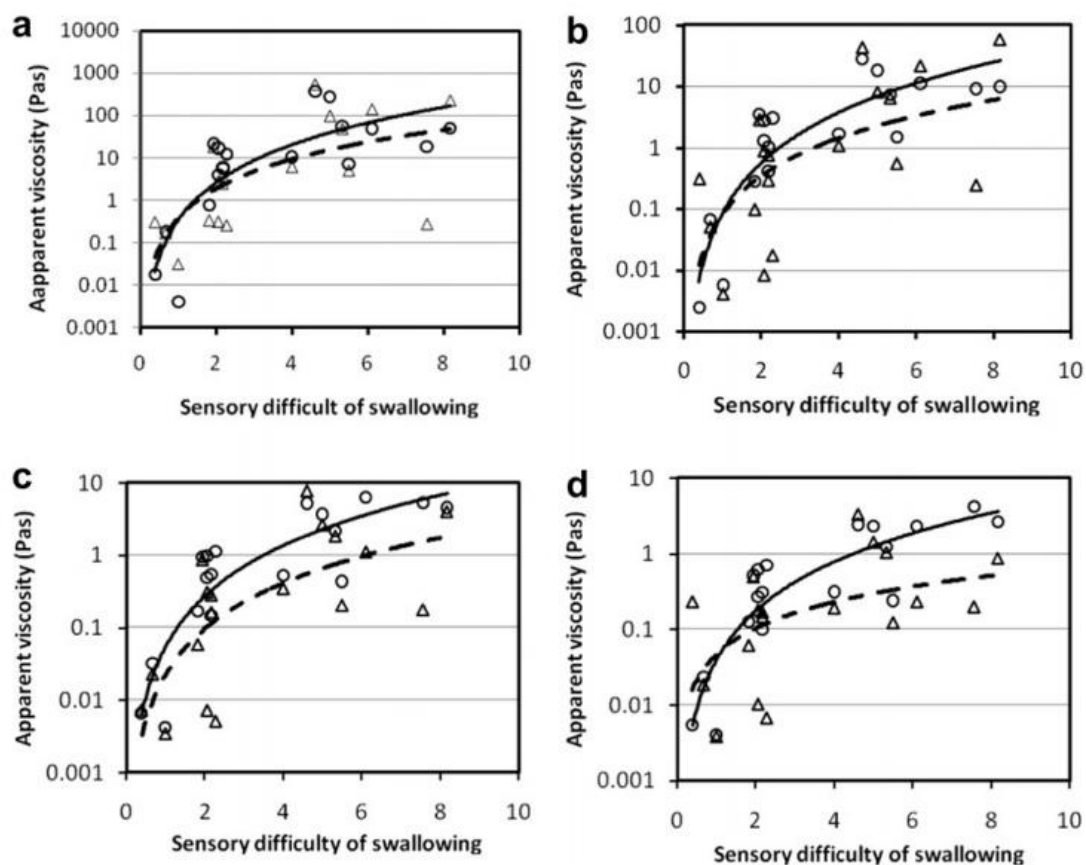


Figura 14 Difficoltà sensoriale nella deglutizione e viscosità stazionaria di boli modello, misurata a diversi gradienti di velocità di scorrimento: (a) $1s^{-1}$; (b) $10s^{-1}$ (c) $50s^{-1}$ (d) $100s^{-1}$ [Chen e Lolivret 2010].

Un analogo risultato è stato osservato con le proprietà reologiche che descrivono il comportamento alla deformazione/estensione. La forza massima e il corrispondente lavoro speso per deformare il bolo hanno evidenziato una relazione esponenziale sia con il tempo di residenza sia con la difficoltà sensoriale alla deglutizione (Figura 15).

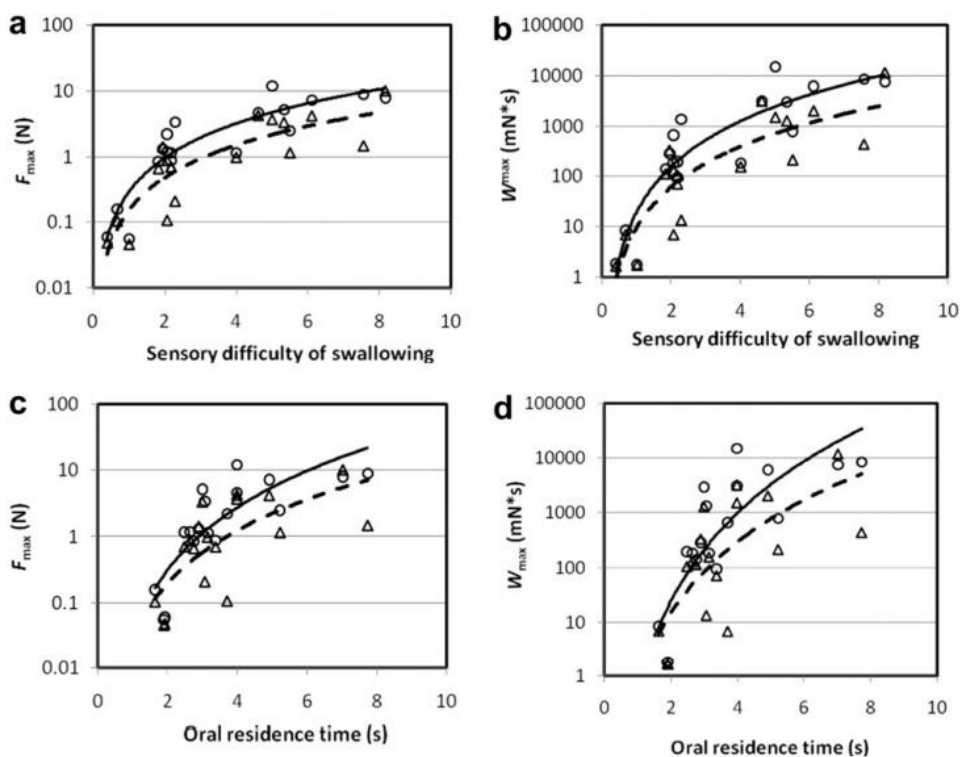


Figura 15 Relazione tra forza massima, lavoro speso per deformare il bolo, difficoltà nella deglutizione percepita sensorialmente e tempo di residenza orale

L'innesco della deglutizione è influenzato da questo parametro reologico. Infatti, durante il transito orofaringeo si ha una caduta di pressione tra la cavità orale e la faringe che comporta la deformazione del bolo.

Sebbene la deformazione durante lo scorrimento e l'estensibilità di un bolo siano rilevanti nella percezione di difficoltà/facilità della deglutizione, (Chen & L., 2011) conclusero che l'estensibilità potrebbe essere l'unico fattore chiave per l'innesco alla deglutizione. È noto, infatti, che gli stadi della deglutizione faringea e esofagea sono riflessi, mentre lo stadio orale della deglutizione avviene volontariamente.

Durante la fase orale, il bolo ha spessori relativamente piccoli quindi è ragionevole attendersi che la viscosità stazionaria, cioè la resistenza misurata in condizioni di scorrimento laminare, rappresenti la proprietà reologica dominante (Buettner et al., 2001). Nella fase

faringea della deglutizione il bolo presenta dimensioni caratteristiche relativamente superiori a quelle della fase orale, subisce elevati stiramenti lasciando ipotizzare che in tali condizioni diventino dominanti le proprietà estensionali quali la **viscosità estensionale**, la **forza** e il **lavoro alla massima estensione** (Buettner et al., 2001).

Valori elevati della viscosità in scorrimento e in estensione aumentano il tempo del transito orofaringeo, la pressione del bolo, la durata della peristalsi faringea, la durata del contatto tra la base della lingua e la mucosa peristaltica (responsabile dell'onda peristaltica posteriore), la durata e l'esecuzione dei movimenti dell'osso ioide, la durata dell'apertura (rilassamento dei muscoli) dello sfintere esofageo superiore (Steele & J., 2010).

Secondo (Ferguson, 1999), la forza che guida il flusso del bolo e la sua deformazione durante il transito oro-faringeo è la caduta di pressione tra la cavità orale e la faringe. L'innesco della deglutizione richiede una pressione di 10kPa nella cavità orale e una pressione di circa 4kPa nella faringe. Questo significa che una caduta di pressione di 6kPa è necessaria per superare sia la perdita di energia dovuta attrito tra bolo per effetto del suo scorrimento sulle pareti del tratto oro-faringeo e la resistenza alla deformazione del bolo stesso durante il transito. Il maggior consumo di energia (caduta di pressione) dovrebbe essere causato dalla deformazione in estensione (stretching) del bolo durante il transito oro-faringeo. Considerando il fatto che gli individui hanno una limitata capacità di applicare elevate pressioni orali, (Chen & L., 2011) ritengono che l'introduzione nel bolo di una quantità sufficiente di saliva, consentendone maggiore fluidità ed estendibilità del bolo, rappresenti la soluzione più logica per una deglutizione confortevole e sicura.

A parità di proprietà reologiche, il volume del bolo rappresenta un importante fattore nella deglutizione. Un elevato volume richiede un grande sforzo propulsivo da parte della lingua e un breve periodo di latenza per evocare l'impulso a deglutire.

Altre proprietà del bolo, diverse da quelle reologiche, concorrono in modo importante sulla deglutizione, quali la capacità di generare stimoli sensoriali chimici e termici. La saliva genera un importante stimolo sensoriale nella normale deglutizione: la sua secrezione migliorano lo stimolo deglutitorio faringeo (Steele & Miller, 2009). Ci sono recettori specifici nella regione faringea (in particolare nello spazio sopraglottideo) che sono fondamentali per evocare lo stimolo per l'innesco di questa tappa (Steele & Miller, 2009). Altri stimoli chimici gustativi possono innescare la deglutizione. Ad esempio, il sentore di acido provoca stimoli acuti che si traducono con un innesco "anticipato" della deglutizione (Steele & Miller, 2009). In studi condotti da (Logemann, 1995) e da Lawless (2003) in pazienti disfagici neurogenici è stato mostrato che il sentore acido, salato e dolce hanno

effetto sull'innescò della deglutizione in diverse tipologie di soggetti, sia sani che affetti da disturbi della deglutizione. Il bolo può generare uno stimolo termico che a sua volta può avere o no un effetto sull'innescò alla deglutizione. Attraverso la stimolazione a freddo dei pilastri anteriori e del ramo interno del nervo laringeo superiore (iSLN) in un gatto sterilizzato, (Kaatzke-McDonald MN, 1996) hanno osservato che il freddo stimola un aumento dell'input faringeo della deglutizione; che boli con temperature superiori a 25.3°C e inferiori a 8.9°C non inducono la deglutizione. Gli stessi autori rilevavano che la stimolazione a freddo delle tonsille in soggetti umani sani non produce effetto sul transito e sul coordinamento dello sfintere esofageo superiore.

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva (Tabella 13) dei più recenti lavori di letteratura focalizzati sulla caratterizzazione reologica del bolo (Panouille´ M., 2016).

Methods	Measured parameters	Food products	Associated sensory methods	References
<i>Rheology</i>				
Texture profile analysis	Hardness, cohesiveness, springiness and adhesiveness	Breakfast cereals	TDS	[6 [*]]
	Hardness, adhesiveness, cohesiveness	Bread	TDS, PP	[10 ^{**} , 17 ^{**}]
Two-cycle penetration test	First peak force, resilience, adhesiveness, flowability	Emulsion-filled gel	TDS, QDA, PP	[18 ^{**} , 19 ^{**}]
Consecutive double compression	Peak force, 'adhesiveness', 'cohesiveness'	Biscuit	TDS	[20]
Penetration test	Cohesive force	Bread	–	[21]
Spreading test	Initial spreading area, rigidity, spreading work, adhesion work	Model dairy product	–	[22]
Compression test	Spreadability, adhesiveness	Cheese	PP, TDS	[23 [*]]
	Height of bolus, yield stress, consistency	Cheese	–	[24]
Back extrusion	Peak force during compression, compression work	Rice	–	[8]
	Flow behavior index, consistency coefficient	Biscuit	TDS	[20]
Capillary rheometry	Peak force	Bread	–	[25]
	Apparent viscosity, consistency index, flow behavior index	Bread	–	[26]
Stretchability	Maximum tensile force, work up to the maximum force	Commercial products covering a wide range of food consistencies; jellies, custards	Ease of swallowing	[27]
Shear (cutting) test	Maximum shear force	Meat	–	[28]
Flow rheometry	Apparent viscosity, consistency index, flow behavior index	Custard	QDA	[29]
	Apparent viscosity	Model dairy product	–	[22]
Oscillatory rheometry	Apparent viscosity	Commercial products covering a wide range of food consistencies; jellies, custards	Ease of swallowing	[27]
	Static yield stress	Breakfast cereals	Sensory profile	[30 [*]]
	Storage modulus G' , loss modulus G'' , critical stress and strain at G'/G'' crossover	Custard	QDA	[29]
	Storage modulus G' , loss modulus G'' , yield strain	Breakfast cereals	Sensory profile	[30 [*]]
	Storage modulus G' , loss modulus G'' , $\tan \delta$	Bread	TI (salt perception), TDS	[10 ^{**} , 26, 31]
	Storage modulus G' , loss modulus G'' , $\tan \delta$	Cheese	PP, TDS	[23 [*]]
<i>Tribology</i>				
Friction test	Friction coefficient	Custard	QDA	[29]
<i>Particle size</i>				
Image analysis	Particle number, size, roundness	Emulsion-filled gel	TDS, QDA, PP	[18 ^{**} , 19 ^{**}]
	Particle number, size	Gel	Sweetness intensity test	[32 [*]]
	Feret diameter	Biscuit	–	[3]
	Particle area, particle size distribution, D50, broadness of distribution	Peanuts embedded in gelatin gel or chocolate	–	[33]
	Particle area	Bread	–	[25]
	Median particle width (w50), w25-75 interquartile range	Bread	TDS, PP	[10 ^{**} , 17 ^{**} , 26]
Sieving method	Histogram of particle area	Pasta	–	[34]
	Particle size distribution	Peanut, almond, pistachio, carrot, radish, cauliflower	–	[35]
Laser diffraction	Particle size distribution	Emulsion gel	–	[36]
	Median particle size D50	Breakfast cereals	TDS	[6 [*]]
	Particle size distribution	Peanut, almond, pistachio, carrot, radish, cauliflower	–	[35]
Compression test	Diameter (D50)	Bread	–	[25]
	Histogram of particle size	Bread	–	[34]
Mathematical modeling	Particle height	Cheese	–	[24]
	Total particle area	Model dairy product	TDS	[37]
<i>Microstructure</i>				
Light microscopy	Qualitative description	Biscuit	–	[3]
Cryo-SEM	Qualitative description	Biscuit	–	[3]
CSLM	Qualitative description	Emulsion gel	–	[36]
<i>Mixing properties</i>				
Image texture analysis	Texture feature contrast	Emulsion-filled gel	TDS, QDA, PP	[18 ^{**}]
Image analysis	Edge detection, contrast, fragmentation, nearest neighbor analysis, frequency analysis	Custard	QDA	[29]

TDS: temporal dominance of sensation; PP: progressing profiling; QDA: quantitative descriptive analysis; TI: time intensity; SEM: scanning electron microscopy; CSLM: confocal scanning light microscopy.

Tabella 13: Metodi strumentali adottati nella caratterizzazione del bolo [Panouillé et al. 2016]

2.2.5 Ruolo delle proprietà di frizione degli alimenti liquidi e bolo

La percezione della texture di un bolo non avviene solo durante la masticazione, ma anche nella fase post deglutizione a seguito della formazione di un sottile film che riveste i tessuti orali del cavo oro-faringeo. Questa tipologia di **percezione viene definita “residuale”**. È stato dimostrato che le proprietà fisiche dominanti nella percezione residuale sono proprietà di superficie (frizione), coerenti con le proprietà reologiche individuati prima della deglutizione e addirittura con le proprietà di frattura (Devezeaux de, et al., 2016). Uno studio basato sull’impiego di tecniche di tribologia orale condotto da Camacho et al, (2015) è stato focalizzato sulla percezione residuale di emulsioni di gelatina. Gli autori hanno evidenziato che un elevato contenuto di grassi così come la presenza di gocce non legate alla matrice del gel risultano entrambe in una maggior percezione di grasso sulla lingua. Tale percezione residuale diminuisce quando il rivestimento di grasso viene rimosso dalla lingua. I meccanismi di percezione orale della texture sembrano essere percepiti in modo molto diverso a seconda che prevalgano le proprietà di bulk (proprietà di massa del liquido) oppure che prevalgano le proprietà di superficie dopo la manipolazione orale. Questo è stato dimostrato da un recente studio condotto da (de Wijk & Prinz, 2011). Le caratteristiche proprie dell’alimento (proprietà di bulk) vengono rilevate in tempi relativamente brevi e vengono associati ad una sensazione orale intensa dove l’alimento viene deformato e ridotto di dimensioni. Le proprietà superficiali emergono più lentamente dopo che il cibo è stato manipolato, le particelle dei cibi solidi sono state ridotte e trasformate in bolo (grazie anche alla saliva). Questo processo provoca una sensazione orale meno intensa ed entrano in gioco le forze di attrito e lubrificazione (proprietà tribologiche) (de Wijk & Prinz, 2011). Per la misurazione di tale transizione sono stati proposti due diversi approcci: l’analisi Time e Intensity (TI) e l’analisi temporale della dominanza della sensazione (TDS). Questi due approcci si basano sul tempo dell’elaborazione orale ritenuta fondamentale per definire il cambiamento che ha la struttura dell’alimento. Nella tabella 10, sono descritte le varie transizioni che subisce l’alimento durante il processo orale e le relative sensazioni in bocca che si avvertono.

Questa tabella descrive come le caratteristiche sensoriali che sono correlate alle proprietà di massa (proprietà meccaniche e reologiche) e alle proprietà di superficie (tribologiche) in funzione della dominanza dei rispettivi regimi di destrutturazione dell’alimento nel processo orale.

Dominating sensation regimes	Textural properties	Sensorial definition	Popular terms
Mechanics/rheology	Hardness	The force required to compress and to deform a food between teeth.	Hard, soft, firm
	Elasticity	The extent to which a compressed food returns to its original size when the load is removed.	Elastic, plastic
	Brittleness	The force at which the material fractures.	Brittle, crunchy, crispy, crumbly
	Cohesiveness	The strength of the internal bonds of food matrix.	Cohesive, crumbly,
	Chewiness	The energy required to chew a solid food until it is ready for swallowing.	Tender, chewy, tough
	Gumminess	The energy required to disintegrate a semi-solid food so that it is ready for swallowing.	Short, mealy, pasty, gummy
	Thickness, viscosity	The force sensed to deform a fluid food.	Thin, viscous, thick, consistent
Rheology/tribology	Particle size & shape		Gritty, grainy, coarse
	Particle shape & orientation		Fibrous, cellular, crystalline
	Juiciness		Juicy, watery
	Fat content		Greasy, oily
	Creaminess	Sensed smoothness of dairy foods.	Creamy
	Slipperiness	The force required for thin layer moving.	Slippery, smooth, rough
	Smoothness	The friction force sensed for relative surface movements.	Smooth, rough
Tribology	Astringency		Astringent

Tabella 14 Profili di texture basati su meccanismi di reologia e sensazione tribologia

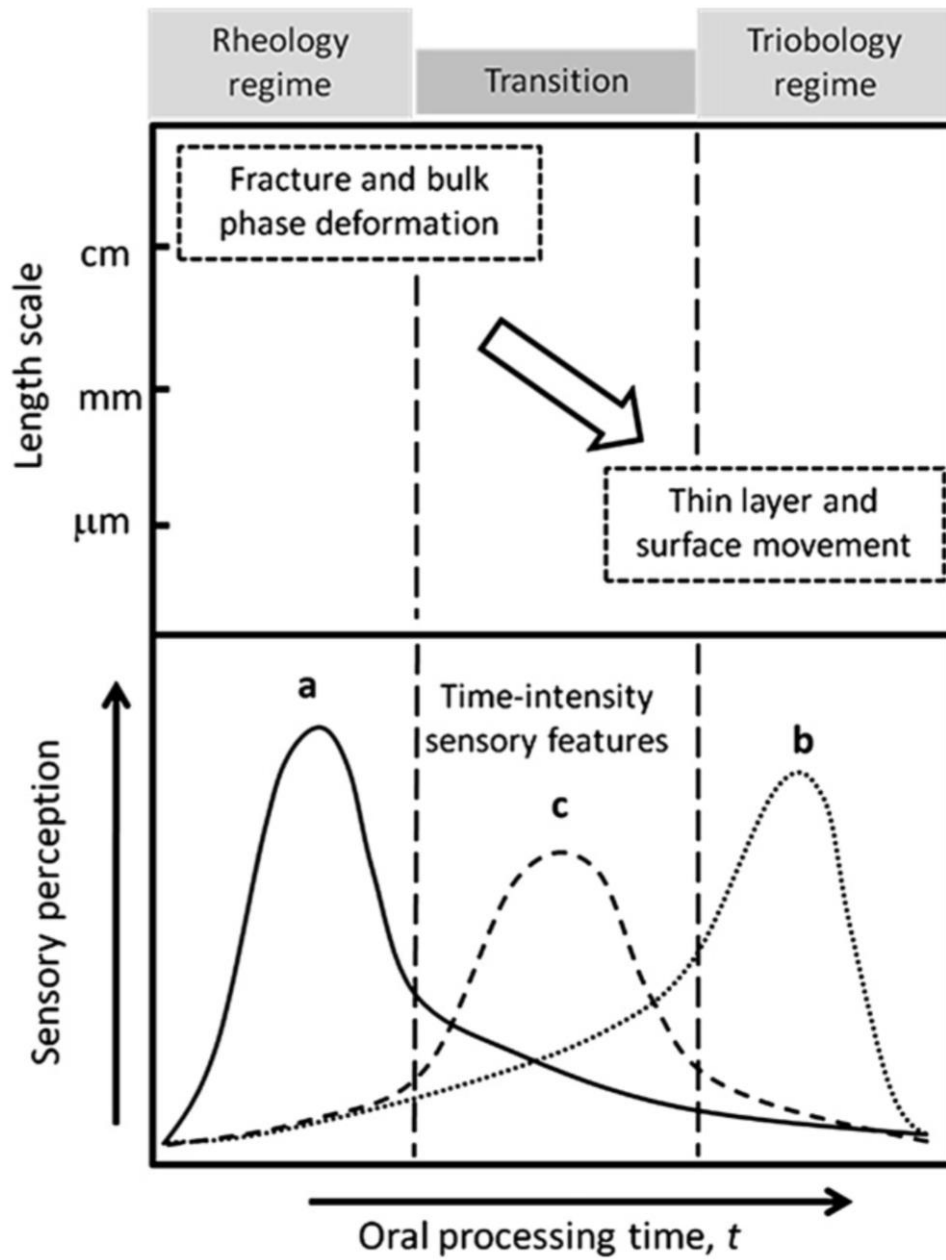


Figura 16 Transizione tra proprietà reologiche e tribologiche

Diminuzione della dimensione delle particelle dell'alimento e della superficie di contatto nel tempo che intercorre tra il primo morso e lo schiarimento orale. La texture dell'alimento è percepita in modo continuo e integrato attraverso l'intera sequenza di masticazione.

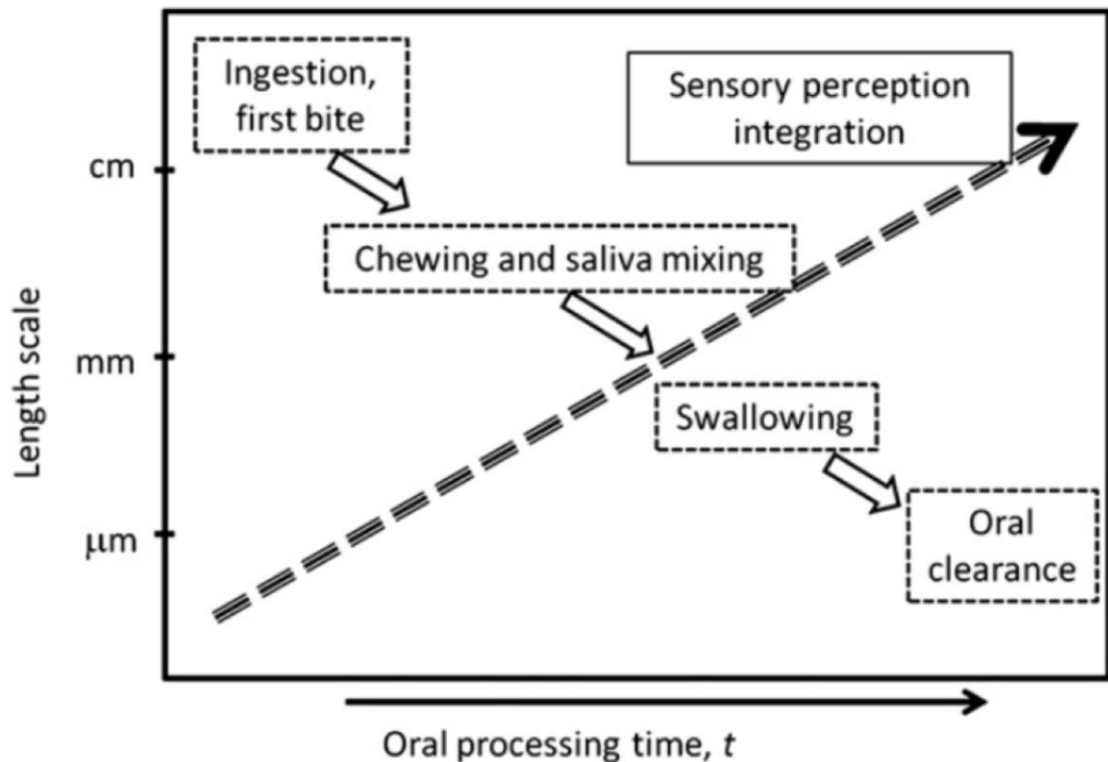


Figura 17 texture dell'alimento percepita durante a masticazione

Quando le dimensioni del cibo posto in bocca sono superiori a $100\mu\text{m}$, durante la fase del primo morso e la fase iniziale della masticazione, predominano le proprietà di massa dell'alimento e quindi sono rilevabili la fermezza, croccantezza, fusione e **degradazione** (in questa fase le misurazioni sono più correlabili alle proprietà reologiche).

Quando lo spessore del cibo è $0,1-100\mu\text{m}$ dopo che è avvenuta parte della lavorazione orale che comprende la miscelazione delle particelle di cibo con la saliva o i liquidi del cibo sono rilevabili la cremosità, levigatezza e scivolosità; caratteristiche che possono essere comparate alle proprietà tribologiche (Chen e Stokes 2012; Stokes et al. 2013). Quando lo spessore si riduce ulteriormente alle dimensioni comprese tra $\text{nm}-\mu\text{m}$, le sensazioni predominanti sono legate alle proprietà di astringenza, ruvidità e omogeneità.

2.3 Psicoreologia - Soglie assolute e Soglie Differenziali

Lo studio della percezione sensoriale è uno dei principali campi di interesse della psicofisica, una neuroscienza che permette la raccolta di misure quantificabili e riproducibili di processi automatici e non coscienti (Bruno, 2016).

La psicofisica si basa su due principi fondamentali (Bruno, 2016): (1) stimoli fisicamente diversi possono essere percettivamente indistinguibili (punti di eguaglianza soggettiva – PES); (2) il funzionamento di un processo percettivo è influenzato dalla sensibilità, cioè dalla capacità di rilevare differenze tra stimoli diversi.

Solo attraverso lo studio della comparazione tra stimoli di grandezze fisiche diverse si può capire come il nostro cervello percepisce gli stimoli.

Lo stimolo è un agente fisico o chimico che provoca la stimolazione e/o eccitazione dei recettori specifici dei 5 sensi.

La sensazione è la rilevazione degli stimoli chimico-fisici provenienti dall'ambiente esterno attraverso il nostro sistema nervoso (costituito dagli organi di senso) e i nostri recettori chimici e somatici.

La Percezione invece è un processo psichico che permette la rielaborazione di questi stimoli esterni in un'esperienza più complessa dotata di significato, pertanto essa è il prodotto finale di un processo di elaborazione dell'informazione sensoriale da parte dell'intero organismo. Non tutti gli stimoli sensoriali possono determinare l'attivazione dei nostri sensi in quanto ogni recettore risponde a stimoli specifici entro determinati limiti. Tali limiti sono determinati da capacità fisiologiche oppure da altri fattori (es. dal grado di attenzione nei confronti degli stimoli stessi). Non è da sottovalutare quindi il concetto di soglia.

La soglia è un valore che un determinato agente o una determinata grandezza (in questo caso uno stimolo) deve raggiungere purché si ottenga un determinato fenomeno.

Esistono due tipi di soglie:

- soglia assoluta; è l'intensità minima di un stimolo perché esso sia percepito (es. l'intensità minima di luce percepibile in una stanza buia)
- soglia differenziale: è la differenza minima di intensità che deve intercorrere tra due stimoli perché siano percepiti come diversi (es. percepire la differenza di intensità tra due luci).
- Soglia di saturazione: superata una certa intensità non si percepisce più il variare dello stimolo.

Il valore di soglia assoluta e differenziale è dato dallo stimolo che provoca una risposta affermativa il 50% delle volte che esso (o la differenza tra i due stimoli) viene posto.

2.3.1 Legge di Weber

Il primo a credere che questo fenomeno potesse essere studiato fu il fisiologo Ernest Weber (1798-1879), che, grazie al processo di discriminazione sensoriale al quale sottoponeva i soggetti, come ad esempio due pesi presenti simultaneamente alla mano destra e alla mano sinistra, si accorse che la sensibilità, intesa come la capacità di rilevare la differenza fra due stimoli, non è costante ma è inversamente proporzionale all'intensità fisica dello stimolo di riferimento. Questo significa che per uno stimolo di riferimento con una grandezza fisica piccola, basta compararlo con uno stimolo poco superiore per percepirne la differenza, mentre per uno stimolo di riferimento con grandezza fisica grande è necessario compararlo con uno stimolo molto superiore per accorgersi di una differenza.

La legge di Weber è rappresentata dalla seguente equazione:

$$\Delta I/I = K$$

Dove ΔI è la soglia differenziale (quanto la grandezza fisica dello stimolo è stata aumentata), I è l'intensità dello stimolo di riferimento e K è la costante di Weber. La costante di Weber è una costante caratteristica di un canale sensoriale, misurato in determinate condizioni. Quindi esistono varie costanti in base alle condizioni e al canale che si sta misurando. La soglia differenziale aumenta ad aumentare dello stimolo perché i sistemi sensoriali hanno capacità adattiva: dato un sistema biologico che ha risorse limitate, è efficiente dotarlo della possibilità di modificare la sensibilità in funzione dell'ordine di grandezza dello stimolo perché gli sarà più utile.

2.3.2 Legge di Weber-Fechner

Fechner riteneva che le osservazioni empiriche di Weber potessero essere rappresentate con un modello matematico. Egli riteneva che le relazioni fra gli stimoli e le corrispondenti variabili fisiche potessero essere rappresentate da funzioni in cui una dimensione ha l'unità di misura fisica appropriata (ad esempio grammi, o centimetri) e l'altra viene invece misurata in unità derivate a partire dalle soglie differenziali. Un po' come dire, così come posso esprimere la misura di una intensità fisica come multiplo di una intensità standard di riferimento, **alla stessa maniera posso esprimere l'intensità percepita come numero di soglie differenziali al di sopra della soglia assoluta**. Ad esempio, una lunghezza fisica può venire misurata in metri, ossia multipli di una lunghezza standard detta metro. Le corrispondenti sensazioni saranno misurate invece da un numero che corrisponde al numero di soglie differenziali, sopra la soglia assoluta, a cui si colloca la corrispondente intensità

fisica. Per questo numero si usa talvolta anche il termine JND (just-noticeable-difference, differenza appena percepibile). Ad esempio, se la soglia differenziale per un peso di 1000g è 20g, diremo che uno stimolo di 1020g (unità fisiche) è 1 JND (unità psicologiche) sopra il peso di 1000g. Partendo dalla legge di Weber, Fechner ricavò analiticamente un modello matematico della funzione psicofisica.

La legge di Weber implica che incrementi uguali in unità psicologiche corrispondono a incrementi (soglie differenziali) sempre maggiori in unità fisiche. Questo significa che l'incremento nella sensazione che si manifesta dopo un certo incremento di intensità fisica non è lineare, ma è una curva che cresce rapidamente a i valori fisici più bassi e poi sempre meno rapidamente (funzione accelerata negativamente).

L'espressione formale della legge di Weber-Fechner è:

$$S = c \log (I / I_0)$$

Ponendo per convenzione $I_0 = 1$, otteniamo

$$S = c \log(I)$$

dove S rappresenta lo stimolo, C dipende dall'unità di misura fisica e dalla costante di Weber e I è l'intensità di partenza.

Questo significa che **l'intensità percepita è proporzionale al logaritmo dell'intensità fisica (Fig. 18).**

La generalizzazione empirica proposta da Weber è approssimativamente corretta per una gamma ampia di forme di energia stimolante, ma lo è tipicamente solo quando l'intensità dello stimolo non è troppo bassa o troppo alta. Avvicinandosi agli estremi di intensità fisica, si osservano deviazioni via via più grandi dalle previsioni della legge di Weber. Di conseguenza, anche la legge di Weber-Fechner descrive meno bene la forma della funzione psicofisica

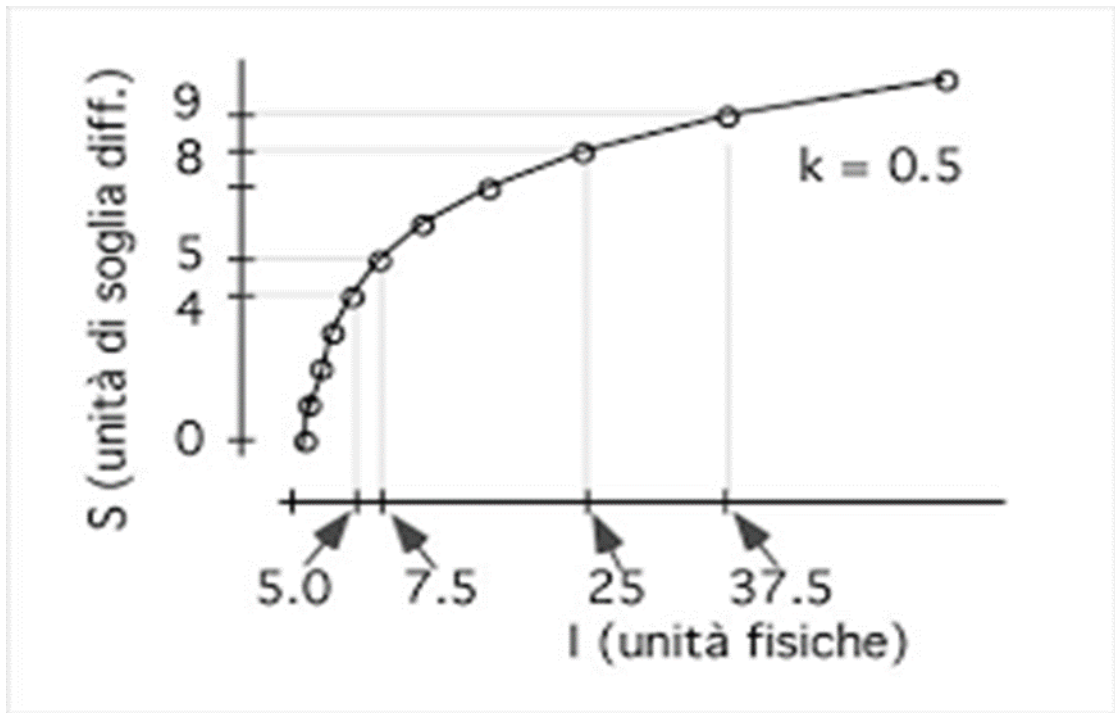


Figura 18 La forma della funzione psicofisica quando la costante di Weber = 0.5. L'origine della curva corrisponde alla capacità di discriminare la presenza di uno stimolo dalla sua assenza, o soglia assoluta (S_0). A uguali incrementi di intensità percepita ($S_1 - S_0 = S_2 - S_1 = S_3 - S_2 \dots$) in unità di JND corrispondono uguali rapporti fra intensità fisiche ($I_1/I_0 = I_2/I_1 = I_3/I_2 \dots$), quindi l'intensità percepita non è proporzionale all'intensità fisica ma al suo logaritmo.

Fechner diede due definizioni ben precise di sensazione e percezione.

La **SENSAZIONE** era la registrazione di **DIFFERENZE** provenienti dall'ambiente esterno; queste producono una **PERCEZIONE** (elaborazione cognitiva) ossia una organizzazione di queste differenze minime in strutture di **RAPPORTI**: da qui lo studio di diversi metodi per la misurazione delle soglie.

2.3.3 Metodo dei limiti

Il metodo dei limiti è un metodo di misurazione delle soglie nel quale è previsto che al soggetto vengano presentati, intervallati da delle pause temporali, degli stimoli di intensità progressivamente crescente o decrescente (a gradini di valore minimo) fino a che il soggetto non riferisce di avvertire un cambiamento. Lo sperimentatore può fornire al soggetto uno stimolo di intensità avvertibile (nettamente sopra il valore di soglia) e procedere a ridurlo di intensità a piccoli passi (serie discendente), chiedendo ogni volta al soggetto se continua ad

avvertire qualcosa. Quando il soggetto smette di avvertire lo stimolo la seduta viene sospesa e vengono registrati i due valori dell'intensità della stimolazione corrispondenti ai due valori di transizione (l'ultimo percepito e il primo non più percepito), e si calcola la media.

Questa procedura può anche essere effettuata in maniera "ascendente" ossia prendendo in considerazione valori al di sotto della soglia di percezione dello stimolo, aumentando a mano a mano tale intensità finché non viene percepita da soggetto. In questo caso si registra il valore di intensità non percepito poco prima e il valore di intensità percepito.

Quando saranno state effettuate un certo numero di presentazioni crescenti e decrescenti, ottenendo cioè un certo numero di transizioni e di valori medi associati ad esse, il calcolo finale della soglia consisterà nel calcolare il valore medio di tutti i valori medi di transizione delle varie serie. Le criticità di questo metodo è inerente principalmente all'adattamento che il soggetto può sviluppare quando viene ripetutamente stimolato e quindi la sua risposta potrebbe arrivare dopo rispetto a quanto dovrebbe, pertanto lo sperimentatore deve avere già un'idea del valore di soglia, e di conseguenza può determinare i valori di partenza delle serie ascendenti e discendenti in modo da evitare di partire da valori troppo bassi o troppo alti di intensità per limitare appunto il fenomeno dell'adattamento.

2.3.4 Metodo degli aggiustamenti

In questo metodo il soggetto ha una parte attiva nell'aumentare o diminuire i valori di intensità degli stimoli (quindi questa volta non vengono scelti dallo sperimentatore) e tale aggiustamento terminerà quando il soggetto rileva un cambiamento.

Anche questo metodo (come quello dei limiti) risente della possibilità che il soggetto si adatti alla stimolazione e che quindi vi siano dei risultati poco attendibili.

2.3.5 Metodo degli stimoli costanti

Il metodo degli stimoli costanti consiste nel presentare ai panel stimoli con vari livelli di intensità al di sopra e al di sotto della soglia (stimolo di riferimento) con la differenza che vengono presentati in ordine casuale rispetto al metodo dei limiti. Il nome "stimoli costanti" sta ad indicare che al soggetto vengono presentati tutti gli stimoli delle varie intensità, ciascuno per un certo numero (costante) di volte (almeno una decina di volte). Questa procedura è volta a individuare la soglia assoluta.

Mentre per l'individuazione della soglia relativa il soggetto viene posto di fronte ad una scelta, in quanto vengono presentati una serie di confronti a coppie in cui degli stimoli di

riferimento verranno confrontati con stimoli di confronto. I partecipanti dovranno scegliere quale dei due stimoli sia più intenso.

Alla fine della valutazione, si prenderanno in considerazione solo le risposte **affermative** per il quale il soggetto ha visto una differenza tra i vari stimoli ai vari livelli di intensità fisica. Queste variano da un minimo di zero ($0/N=0$) ad un massimo di uno ($N/N=1$). Questi valori verranno messi in relazione in un grafico con i valori stessi dell'intensità degli stimoli presentati, grafico che prende il nome di **funzione psicometrica (Fig. 19)**. La soglia (assoluta o relativa- in base al test effettuato) verrà calcolata andando a tracciare la linea che taglia l'asse delle proporzioni delle risposte affermative sul valore di 0,5 ($N/2$) ossia del 50%, intercettando la funzione psicometrica e determinando il valore di intensità fisica corrispondente sull'asse delle intensità.

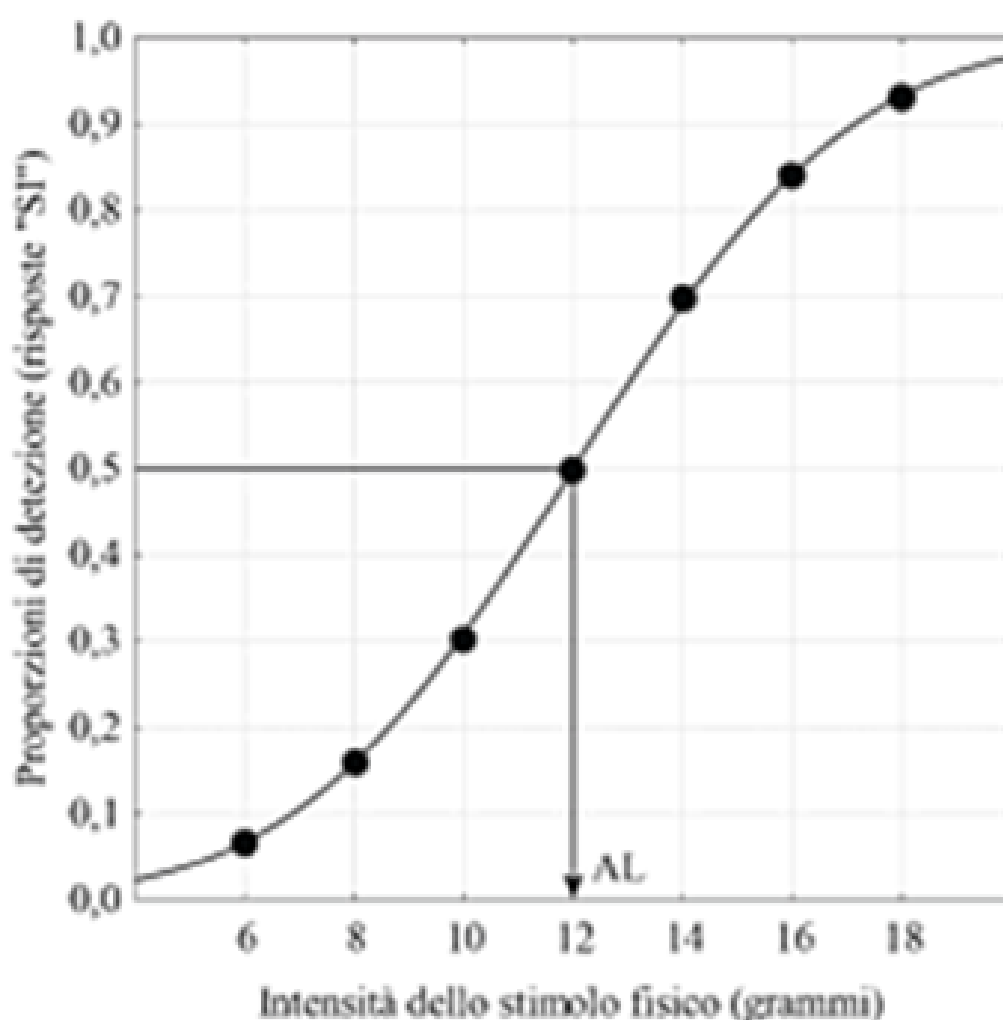


Figura 19 Funzione psicometrica

Dopo gli studi di Weber e Fechner vale la pena di sottolineare il contributo dello scienziato americano Stevens (1906-1973), il quale ebbe un approccio diverso da quello Fechner.

Egli credeva in un approccio più diretto; mentre i metodi proposti da Fechner erano in un certo senso guidati perché le intensità fisiche degli stimoli erano note, Stevens permetteva ai soggetti stessi di assegnare il valore dell'intensità rispetto allo stimolo rilevato, con diversi metodi.

Egli propose che la forma generale delle funzioni psicofisiche non è la curva logaritmica di Fechner, ma una famiglia di curve in cui l'intensità delle sensazioni è proporzionale all'intensità fisica elevata a esponenti caratteristici del canale sensoriale indagato (funzioni potenza).

$$s = c I^a$$

dove S è l'intensità della sensazione, I l'intensità fisica dello stimolo, c'è una costante di proporzionalità che dipende dall'unità di misura dello stimolo, e a è un esponente che dipende dal tipo di stimolo che viene misurato. Grazie ai metodi da lui sviluppati, che si caratterizzano per una notevole semplicità e flessibilità di utilizzo, Stevens misurò l'esponente caratteristico di un gran numero di forme di stimolazione fisica (Figura 20).

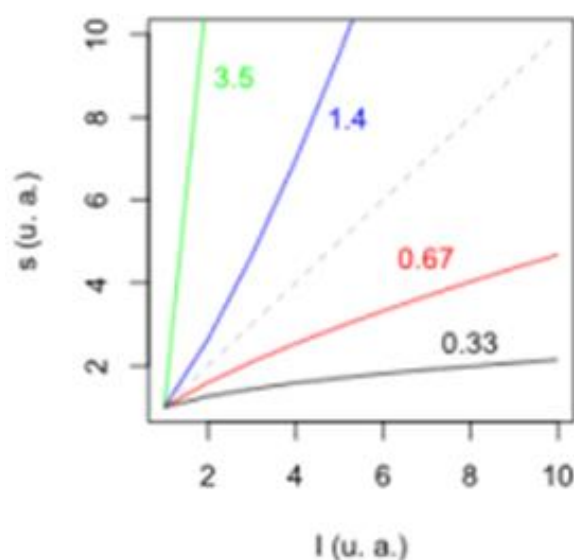


Figura 20 Funzioni psicofisiche (funzioni potenza) secondo Stevens. Gli esponenti sono indicati nel grafico. Per semplicità si assume che $c = 1$ (stessa unità di misura per tutte, u.a. = unità arbitrarie). La retta grigia tratteggiata è la funzione potenza con esponente 1.

Esponenti minori di 1 producono funzioni psicofisiche corrispondenti a curve in cui la sensazione cresce velocemente all'inizio e poi sempre più lentamente. Quindi queste curve, pur avendo forma diversa, esibiscono una “compressione” della dimensione psicologica al crescere di quella fisica proprio come la funzione logaritmica di Weber-Fechner. Studiando altre forme di stimolazione, Stevens trovò tuttavia anche casi in cui l'esponente è maggiore di 1. Ad esempio, l'esponente per la sensazione di salato, misurata stimolando la lingua con una piccola quantità di cloruro di sodio, è 1.4.

Esponenti maggiori di 1 producono curve molto diverse da quelle di Fechner, in cui l'intensità della sensazione cresce molto rapidamente al crescere dell'intensità fisica, ossia esibiscono una “espansione” della risposta. Stevens riteneva che la funzione potenza sia il modello migliore per descrivere le relazioni psicofisiche, proprio perché capace di prevedere sia risposte “compressive” sia risposte “espansive”.

Le criticità dei metodi di Stevens sono che ogni partecipante assegnava l'intensità dello stimolo, di questi valori poi venivano calcolate le medie e a partire da queste medie veniva stimato il modello matematico. Questa strategia non garantisce che, per tutti gli individui misurati, l'esponente fosse lo stesso o addirittura che la forma della **funzione psicofisica** fosse effettivamente una funzione potenza.

2.4 Alcuni metodi di valutazione sensoriale

La valutazione sensoriale della consistenza viene realizzata principalmente attraverso il tatto, anche se l'aspetto visivo e il suono forniscono anch'essi informazioni importanti.

Le analisi sensoriali si basano sulla raccolta di dati di prove di degustazioni fatte da assaggiatori esperti o inesperti (valutazioni cosiddette affettive) per poterli confrontare con dati analitici (TPA).

La differenza principale tra la valutazione di un assaggiatore esperto e la valutazione di un consumatore è che l'ultimo valuta in base alle proprie preferenze individuali e l'analisi è puramente statistica sull'indice di gradimento del prodotto.

Un'analisi effettuata da un assaggiatore esperto si focalizza principalmente sulle proprietà del prodotto limitando o tenendo sotto controllo le differenze individuali tra i soggetti che partecipano alle valutazioni.

Nella descrizione sensoriale di un prodotto attraverso specifici termini precedentemente concordati, l'esperienza e l'addestramento predispongono a un'attenzione selettiva verso

specifiche sensazioni attraverso un processo di scomposizione della complessità sensoriale percepita.

La selezione di individui che andrà a comporre il panel di assaggiatori deve essere accurata in quanto questi devono essere in grado di descrivere le più sottili differenze tra i campioni, ponendo appunto il focus sull'alimento in questione piuttosto che sui gusti dei singoli. Ovviamente più è grande il numero di giudici, minore è la possibilità che pochi di essi distorcano la media dei punteggi; inoltre, in fase di analisi dei risultati, si può non tenere conto dei soggetti meno attendibili.

Prima e durante ogni seduta di assaggio i giudici vengono informati sui comportamenti da tenere durante la seduta, sullo scopo della prova e viene stabilita e spiegata a priori la terminologia appropriata alle caratteristiche che andranno a valutare.

Per effettuare una correlazione con i dati strumentali essi vengono adattati ai valori delle scale sensoriali (se si tratta di scale numeriche che descrivono l'intensità dello stimolo) oppure si effettua una correlazione con la terminologia utilizzata durante la seduta (in caso di valutazione qualitativa).

La valutazione sensoriale comprende diversi passaggi che avvengono sia all'esterno che all'interno della bocca come ad esempio il primo morso, le fasi iniziali e finali della masticazione, della deglutizione e la sensazione residua del cibo in bocca e in gola (Brandt, 1963); (Szczesniak, 2002).

Alcune proprietà meccaniche come fermezza, fratturabilità, e la viscosità si percepiscono durante il primo morso, mentre la gommosità, la masticabilità e l'adesività viene valutata durante la fase masticatoria e il residuo che ricopre le pareti della bocca è percepito tardi o come attributo residuo dopo la deglutizione.

2.4.1 Alcuni metodi di valutazione sensoriale della texture

L'analisi qualitativa descrittiva (QDA) è una tecnica utilizzata per caratterizzare gli attributi sensoriali percepiti in termini quantitativi (Stone, 1974).

Questo tipo di analisi è stata una delle principali tecniche utilizzate per l'acquisizione di informazioni dettagliate, affidabili e riproducibili per descrivere i profili sensoriali.

Check-all-that-apply (CATA) è uno strumento semplice di profilazione sensoriale veloce che viene spesso utilizzato negli studi sui consumatori (Lazo O., 2016).

I membri del panel hanno il compito di controllare tutti gli attributi sensoriali presenti in un elenco fornitogli per la valutazione. Questo metodo è incentrato sulla valutazione qualitativa e non quantitativa degli stimoli analizzati.

I metodi QDA e CATA servono per analizzare gli attributi sensoriali in un dato momento. Successivamente sono stati sviluppati metodi di analisi che includono la valutazione sensoriale dinamica nei vari cambiamenti della texture durante tutto il processo della valutazione orale.

Il metodo della valutazione dell'Intensità del tempo (TI) consiste nel descrivere in sequenza l'intensità di un attributo selezionato (Lee & Pangborn, 1986) (Cliff & Heymann, 1993); (Jack, et al., 1994); (Sprunt, 2002); (Le Révérend, 2008), mentre il TDS (metodo di dominanza delle sensazioni), al giudice è richiesto di scegliere continuamente durante la prova qual è lo stimolo più intenso tra quelli presenti in un elenco fornito (Labbe, 2009); (Pineau N., s.d.); (Cheong, 2014); (Fizman & Tarrega, 2018). Entrambi si basano sul tempo di manipolazione dell'alimento.

Nel TCATA (che tradotto letteralmente significa "controllo orario di tutte le cose valide") il giudice esprime la percezione degli attributi che rileva in successione durante tutta la prova (Ares, et al., 2015); (Castura, 2016)

I metodi descritti sopra non hanno lo scopo di valutare l'intensità degli stimoli proposti, ma semplicemente di rilevarne la predominanza di uno o più stimoli in ogni momento della prova.

La valutazione sensoriale della texture degli alimenti rimane una misurazione soggettiva di queste caratteristiche in quanto, anche standardizzando le procedure e addestrando i giudici, comunque interverranno sempre le caratteristiche soggettive degli individui come l'età, il sesso, lo stato di salute, la predisposizione genetica ad avere degli organi di senso più recettivi, l'esperienza di assaggio di quel determinato alimento, la componente emotiva e il grado di attenzione che si presta durante la valutazione.

ANALISI STRUMENTALE DELLA TEXTURE

L'analisi strumentale della texture di un alimento può avvalersi di tre tipi di approcci: fondamentale, empirico e imitativo (Scott-Blair, 1958); (Rosenthal, 1999); (Bourne, 2002). Le misure dette fondamentali sono quelle che dipendono solo dalla natura chimico-fisica del materiale e non dalle condizioni sperimentali (geometria del campione, parametri strumentali). La loro determinazione di basa sull'applicazione non distruttiva di campi di flusso o di deformazione controllati, tipicamente a taglio o elongazionali, e quindi noti "a priori", cui il materiale risponde con un campo di sforzi. Esiste la possibilità anche di operare all'inverso e cioè applicare un campo di forze e quindi misurare il risultante campo di deformazione. Il legame tra questi due campi, in entrambi i casi, costituisce la caratteristica reologica del materiale trattato, quindi si può osservare come questo modo di procedere produca parametri e funzioni materiali che fisicamente sono ben definiti. Questo tipo di misurazioni non si correlano all'esperienza umana della percezione della texture principalmente perché le misure fondamentali si riferiscono a una condizione di stato stazionario di equilibrio tra sforzo e deformazione, mentre l'uomo valuta sin da subito la struttura, prima che essa raggiunga questo stato di equilibrio.

I metodi empirici sono distruttivi e sono più facilmente comparabili con l'analisi sensoriale, anche se sono meno affidabili in termini di ripetibilità e riproducibilità. Per misure empiriche si intende misure basate su una lunga esperienza operativa di una determinata caratteristica, ma che risultano affidabili solo per un controllo estremamente standardizzato delle condizioni sperimentali. Tuttavia, i risultati derivanti da test empirici per loro natura sono difficilmente comparabili tra loro in quanto sono stati ottenuti in condizioni sperimentali differenti.

3.1 Successi e limiti dell'approccio meccanico distruttivo

Uno dei primi successi sulla caratterizzazione della consistenza degli alimenti fu proprio lo sviluppo di un Bloom Gelometer, brevettato nel 1925. Il dispositivo utilizza uno stantuffo di 12,7 mm di diametro per penetrare un gel e il peso dello stantuffo che riesce inserirsi nel gel per una profondità di 4 mm viene utilizzato per quantificare la forza del gel. Questo metodo misura essenzialmente la resistenza meccanica (o durezza) del materiale ed è generalmente in grado di differenziare gel alimentari per applicazioni industriali. I metodi imitativi tentano di simulare le condizioni a cui è sottoposto il cibo durante l'azione umana. Poiché lo

strumento imita i movimenti umani (in maniera empirica), i parametri che si ottengono aiutano a spiegare la percezione umana della consistenza. Nel 1963 Szcznesiak e i suoi collaboratori svilupparono la Texture Profile Analysis (o TPA). In origine, la TPA è stata realizzata con l'utilizzo di Texturometer (Friedman, 1963), in cui una sonda viene utilizzata per imitare un dente molare. Il movimento della sonda ricorda la sequenza di due morsi, anche se la posizione del cibo e il molare inferiore è capovolto. Attraverso l'analisi del risultato delle curve forza-tempo che si ricavano i parametri della consistenza come la durezza, l'adesività e la coesione. Dopo diversi anni, Bourne propose un TPA "a due morsi" utilizzando una macchina di prova universale Instron (Bourne, 2002). Il test consiste nell'effettuare due cicli di compressione e rilascio sull'alimento posto sul piatto porta campione attraverso un cilindretto. Per imitare il fenomeno che avviene durante la masticazione il macchinario arriva ad imprimere fino a 90% della compressione sull'alimento. La curva di cilindrata registrata riflette la resistenza del materiale alimentare contro la deformazione e può essere utilizzato per interpretare alcune importanti caratteristiche meccaniche, come durezza, fragilità, elasticità, adesività, ecc (Figura 21)

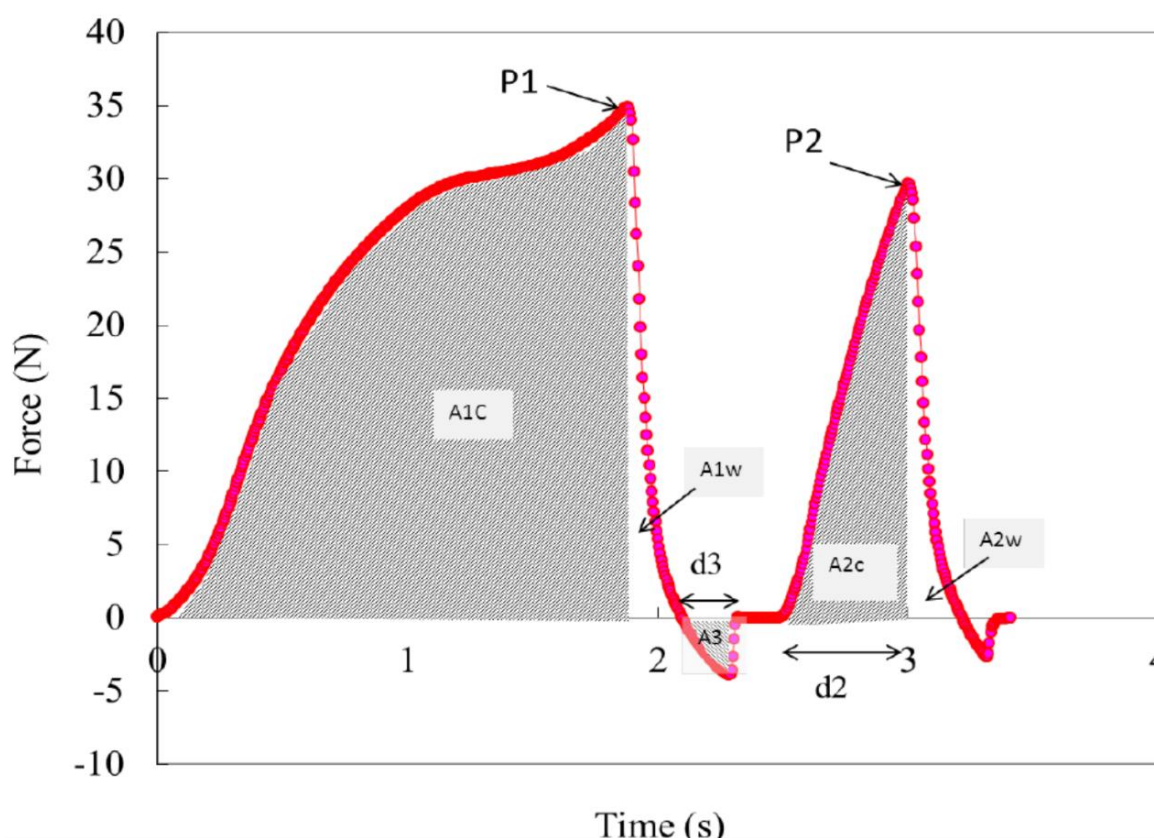


Figura 21 Tipica curva forza-tempo da cui si calcolano gli attributi del profilo della texture (Texture Profile Analysis, TPA)

(Szczesniak, 1968) e (Brandt, 1963) raggrupparono le proprietà di texture come iniziali (al primo morso: durezza, viscosità, fragilità), masticatorie (durante la masticazione: gommosità, masticabilità, adesività) e residue (velocità di rottura, tipo di rottura). I parametri TPA originali definiti dal gruppo General Foods Corporation sono riportati nella seguente tabella:

TPA parameter (SI unit)	Definition	How measured
Hardness (N)	Force required for a pre-determined deformation	Force at P1
Fracturability (N)	Force at the first significant break in the curve	Force at F1
Cohesiveness (no unit)	Strength of internal bonds in the sample	A_2/A_1
Adhesiveness (J)	Work required to overcome the sticky forces between the sample and the probe	A_3
Gumminess (N)	Energy needed to disintegrate a semisolid food until it is ready to swallow	Hardness* Cohesiveness
Chewiness (J)	Energy needed to chew a solid food until it is ready for swallowing	Hardness* Cohesiveness* Springiness
Springiness (m)	Originally called "Elasticity": rate at which a deformed sample returns to its original size and shape	d_2
Stringiness (m)	Distance travelled by the probe during the negative force area A_3	d_3

Tabella 15 Descrittori originali della texture

L'altezza del picco di forza massima nel primo ciclo di compressione (primo morso) è definita come durezza (hardness). La fratturabilità è definita dalla prima rottura nella curva dove vi è il primo picco significativo di diminuzione della forza (durante la prima compressione). La coesività si ottiene facendo il rapporto delle aree relative alla prima e alla seconda compressione ($A1C/A2C1$) e rappresenta come il prodotto sopporta una seconda deformazione e come si è comportato nella prima. L'area che rappresenta la forza negativa relativa al primo morso ($A3$), indica il lavoro necessario per staccare via il cilindro che comprime il campione e questo descrive l'adesività di esso. La springiness viene definita come il tempo che l'alimento impiega per ritornare alla sua altezza (questa viene calcolata tra la prima e la seconda azione del pistone - $D2/ D1$) espressa in mm). Questa caratteristica

rappresenta il ritorno elastico del materiale. Altri due parametri importanti ricavati dalla curva sono la gommosità (durezza X coesività) e masticabilità (gommosità X springiness). Questa tecnica ha un risultato rilevante solo per i processi di compressione che descrivono la durezza, la fragilità e in una certa misura anche la coesività di un alimento solido o semi-solido (Bourne, 2002), mentre ha dei forti limiti per quando riguarda la misurazione di fluidi e semi-fluidi alimentari dove le rilevazioni più significative riguardano il flusso del fluido e le proprietà di superficie (cremosità, morbidezza, consistenza, scivolosità, ecc.).

Per alimenti di geometria irregolare sono state recentemente proposte alcune strumentazioni per la misura empirica della resistenza meccanica: il Magness - Taylor's tester per analizzare la durezza della frutta, il Kramer Shear Press per la durezza di frutta, verdura e legumi lavorati e il Warner - Bratzler Shear machine per la tenerezza della carne (Bourne, 2002).

I test sopracitati sono stati progettati al fine di fornire misurazioni oggettive che riflettono le valutazioni sensoriali fatte dai giudici durante le sedute di prova.

(Szczeniak & Hall, 1975) hanno affermato che è altamente auspicabile e ricercato che i giudici addestrati durante i test rilevino delle caratteristiche di texture che con la sola analisi strumentale non sarebbero rilevabili.

In realtà, il movimento della mandibola durante la masticazione degli alimenti è definito dalla forza esercitata, non dalla distanza percorsa. Lo stress applicato dalle persone anziane è sicuramente inferiore a quello esercitato dai soggetti più giovani. Il primo percepirà così la sensazione di durezza ad una soglia di stress inferiore.

È ormai generalmente accettato che le proprietà meccaniche misurate tramite TPA non siano applicabili a tutte le proprietà di texture, ma siano comparabili solo alle caratteristiche che riguardano i processi di compressione.

Ad esempio, la durezza percepita è stata correlata con successo alla forza di compressione massima misurata (Bourne, 2002). La fragilità percepita è stata correlata alla natura a zig-zag della curva di spostamento della forza (Chen, et al., 2005). L'adesività percepita è stata correlata alla forza di separazione (negativa) da un test di compressione (Chena, et al., 2008); (Kilcast & Roberts, 2007). (Monaco, et al., 2008) hanno dimostrato che utilizzando un test di compressione a più cicli, la durezza percepita e l'elasticità (di 15 diversi tipi di alimenti) potevano essere efficacemente previste dalle misurazioni del TPA, sebbene la previsione della coesione fosse meno soddisfacente.

(Nishinari, 2013) hanno rilevato che il metodo strumentale Texture Profile Analysis (TPA) è utile per la maggior parte degli alimenti solidi.

Utilizzando questo approccio strumentale sugli alimenti liquidi potrebbero essere fraintesi i risultati ottenuti dall'analisi in quanto essa non è adatta a descrivere le proprietà materiali tipiche di questi alimenti come la viscosità, viscoelasticità e *Yield stress*. (Kumagai et al., 2011; Nouchi et al., 2012)

Il metodo TPA dovrebbe essere nuovamente revisionato prevedendo l'opportunità di determinare nuovi descrittori meccanici che meglio rappresentino la percezione sensoriale della texture di alimenti solidi e semi-solidi.

Va ricordato che non è possibile confrontare direttamente i parametri TPA osservati per campioni alimentari con diverse consistenze, e il significato fisico dei parametri TPA non può essere interpretato unanimemente in senso rigoroso perché si tratta di un test empirico.

3.2 Successi e limitazioni dell'approccio reologico

Negli ultimi anni i ricercatori si sono focalizzati nel trovare metodi reologici non distruttivi che si potessero correlare alla percezione sensoriale della texture.

Esistono numerose proprietà reologiche fondamentali che possono essere utilizzate per caratterizzare la struttura su scala sovra-molecolare e la resistenza alla deformazione/scorrimento degli alimenti. Le principali misure fondamentali includono il modulo elastico, modulo viscoso, tempo di rilassamento, viscoelasticità. Il termine "*tempo di rilassamento strutturale*" è utilizzato per indicare la capacità tempo-dipendente di auto-aggiustamento a corto e lungo raggio delle posizioni relative tra atomi e molecole, necessario per raggiungere un nuovo equilibrio, ad esempio durante l'applicazione o dopo la rimozione di una sollecitazione meccanica oppure ad un nuovo equilibrio termico. In funzione delle condizioni di sforzo o deformazione applicate, la risposta reologica delle matrici alimentari presenta componenti elastiche, viscoelastiche e viscoplastiche. La risposta elastica rappresenta la capacità di deformare attraverso meccanismi di rilassamento strutturale istantanei. La risposta viscoelastica rappresenta la capacità di deformare attraverso meccanismi di rilassamento ritardati. La risposta viscosa o plastica rappresenta la capacità di deformare attraverso meccanismi di deformazione indipendenti dal tempo. Le componenti strutturali elastiche e viscoelastiche sono responsabili della memoria strutturale reversibile. Il termine "*viscoelasticità*" è utilizzato per descrivere la simultanea esistenza delle proprietà elastiche e viscoso e quindi per indicare una risposta di deformazione istantanea seguita da

una ritardata, entrambe reversibili. Il grado di viscoelasticità mostrato dai fluidi alimentari che presentano un comportamento non-Newtoniano durante lo scorrimento, dipende dalla scala temporale di osservazione e dal gradiente di velocità applicato (Stokes & GA..., 2007). La determinazione delle proprietà viscoelastiche fondamentali può essere fatta solo applicando piccole deformazioni (materiali solidi e semi-solidi) o piccoli gradienti di velocità (materiali liquidi strutturati). Solo se le condizioni di misura possono essere considerate non distruttive sulla struttura esaminata nella scala superiore a 100 micron (in questo caso si parla di “deformazioni reversibili”) è possibile definire “fondamentali” le proprietà reologiche misurate sperimentalmente. La tecnica reologica standard è quella denominata “Small-amplitude oscillatory shear (SAOS)” che consente di realizzare condizioni di sollecitazioni reversibili e non distruttive. Questa tecnica consente di individuare e quantificare le due principali componenti della resistenza alla deformazione reversibile: (i) la componente elastica conservativa (nota come G') e la componente viscosa dissipativa (nota come G''). Il ritardo della risposta viscoelastica può essere quantificato dal rapporto della componente viscosa su quella elastica (G''/G') nota come $\tan(\delta)$. Il valore di (δ) è chiamato “fase lag” o angolo di sfasamento, e rappresenta il grado di somiglianza del materiale esaminato alla risposta reologica del solido elastico ideale o ad un liquido viscoso ideale. La cui legge costitutiva di un solio ideale è la quella di Hooke $\sigma = E \cdot \varepsilon$, secondo la quale si osserva una deformazione proporzionale allo sforzo applicato. La legge costitutiva del comportamento reologico di un liquido viscoso ideale è quella di Newton, cioè $\sigma = \eta \cdot (d\varepsilon/dt)$, secondo la quale lo sforzo necessario per far scorrere un liquido è proporzionale al gradiente di velocità lungo lo spessore del liquido stesso rispetto alla superficie di scorrimento. Pertanto, in funzione del modulo elastico conservativo e del modulo viscoso dissipativo, il comportamento reologico di un alimento può essere classificato come simile a quello di un solido oppure a quello di un liquido: “solid-like” se $G' > G''$, oppure “liquid-like” se $G' < G''$. Per matrici alimentari complesse, i due moduli, G' e G'' , possono essere funzione del tempo e della frequenza di sollecitazione (Figura 22)

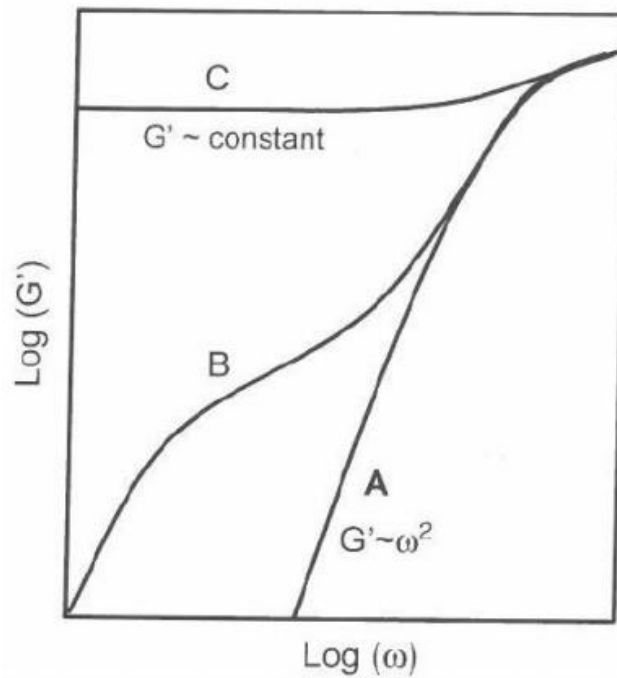


Figura 22: Modulo conservativo vs frequenza di sollecitazione per un fluido elastico ideale (A), un fluido elastico con tempi di rilassamento multipli (B) e materiale semisolido (C) [Dealy e Larson 2006, Ferry 1980]

La “viscosità” dei materiali reali può essere misurata in condizioni di flusso continuo, ma in questo caso non deve essere considerata una proprietà fondamentale, in quanto la sua misura dipende dalle condizioni sperimentali utilizzate per la sua determinazione. Per tale motivo è chiamata “viscosità apparente”. In particolare, quando la viscosità di una matrice liquida è misurata in condizioni di scorrimento sotto l’applicazione di sforzi di taglio stazionari, la viscosità è chiamata “viscosità stazionaria” e deve essere riferita necessariamente al valore del gradiente di velocità applicato sperimentalmente (shear-rate). Quando la viscosità di un materiale solido o semi-solido è determinata in condizione di compressione o trazione come funzione, deve essere indicata come “viscosità estensionale” e riferita allo specifico livello di deformazione applicato sperimentalmente. Durante lo scorrimento di fluidi reali o durante la deformazione di solidi o semi-solidi reali si sviluppano componenti di sforzo ortogonali alla direzione di applicazione dello sforzo principale applicato. Lo sforzo normale è noto come “normal stress” (N). In condizione di piccole deformazioni o piccoli gradienti di velocità di scorrimento, le tre componenti ortogonali del *normal stress* hanno lo stesso valore e sono uguali alla pressione ambientale. Solo quando tali deformazioni o scorrimenti non sono trascurabili, si registrano differenze nelle tre componenti dello stress normale. Una

relazione di potenza è solitamente osservata tra *normal stress* e gradiente di velocità (o deformazione applicata) che dipende dal sistema materiale.

Sotto il profilo del comportamento reologico, gli alimenti possono essere classificati come “solidi”, “solidi soffici”, “semi-solidi” e “liquidi altamente strutturati”. Il rapporto delle componenti elastiche e viscosi così come il valore del *normal stress* possono essere utili ai fini della classificazione del comportamento reologico degli alimenti. Tutti i liquidi alimentari presentano strutture sovramolecolari (cluster sub-colloidal e aggregati colloidal) che interagiscono tra di loro con legami deboli: la reversibilità di queste interazioni permette a queste strutture di scorrere l’una rispetto all’altra in condizioni di sollecitazione esterna. Al limite di piccoli gradienti di velocità di scorrimento o sforzi, un liquido strutturato può mostrare $G' > G''$ e G' costante per frequenze comprese tra 0,1 e 10 rad/s (Stokes J. R., 2013). In tali condizioni di sollecitazione, un liquido altamente strutturato rimane in quiete dinamica (non scivola). Un flusso apprezzabile avviene solo quando si supera un valore critico di *shear stress*, definito come “sforzo limite di scorrimento” (*Yield stress*). Questa proprietà reologica è molto utile per caratterizzare liquido molto strutturati, ad esempio dopo l’aggiunta di additivi strutturalmente attivi come gli agenti gelificanti. Una varietà di agenti strutturanti è spesso impiegata per garantire la stabilità a lungo termine degli alimenti (shelf-life) sotto una varietà di condizioni ambientali. Gli agenti strutturalmente attivi impiegati per ottenere una modifica della texture degli alimenti liquidi si differenziano in “agenti addensanti”, quando influenzano lo *Yield stress*, e in “agenti gelificanti” quando determinano modifiche nei valori di G' e G'' e nella risposta viscoelastica.

Gli alimenti semisolidi possono essere classificati in due modelli definiti gel o *soft-glass*. Un gel permette la formazione di un reticolo poroso grazie alle interazioni attrattive e/o la formazione di legami tra i costituenti a basse frazioni volumetriche. Per esempio, i polisaccaridi fisicamente si associano per formare una struttura reticolata polimerica, mentre le proteine si comportano possono essere considerate come colloidi sferici che si aggregano a seguito delle forze attrattive superficiali. Lo stato di *soft-glass* avviene ad elevati volumi dove le particelle “soffici” sono vicine l’una all’altra così da formare una fase solida disordinata. Questa fase è ritenuta essere dinamicamente arrestata (*jammed state*) a piccole deformazioni [Stokes e Frith 2008]. La sofficià delle particelle permette loro di avere una natura deformabile (microgel, cellule vegetali, granuli di amido gelatinizzato, micelle proteiche come quelle della caseina), di essere ricoperti superficialmente. Nonostante la diversa microstruttura di un gel e di un *soft-glass*, entrambi sono considerati in uno stato di disequilibrio che permette alle unità strutturali di essere in una configurazione *jammed*. Le

proprietà reologiche di alimenti soffici non sono solo definite dalle interazioni tra i componenti o dall'organizzazione della microstruttura, ma anche dalle proprietà meccaniche e dalla forma degli stessi componenti strutturali. In un *soft-glass* di particelle di microgel, i moduli delle particelle determinano le proprietà reologiche macroscopiche poiché nelle immediate vicinanze possono deformarsi e assorbire stress nel sistema (Adams s., 2004). Per schiume ed emulsioni la forza dell'interfaccia aria-liquido e olio-acqua è tipicamente il fattore determinante.

La generalizzazione di un *soft food* nello stato di “gel” oppure di “*soft-glass*” permette una utile semplificazione del comportamento reologico della struttura degli alimenti, così che i componenti chiave che contribuiscono alle proprietà reologiche del materiale possano essere facilmente identificate e potenzialmente modellate matematicamente per prevedere il comportamento in varie condizioni ambientali di deformazione e nel tempo.

Anche la saliva, come gli alimenti liquidi, deve essere considerato un liquido reologicamente complesso (non Newtoniano). La stimolazione di saliva e le sue interazioni con gli alimenti e le bevande la rendono un componente chiave nel processo orale. Mentre la sua importanza è riconosciuta, la comprensione o la valutazione del suo impatto sul comportamento reologico del bolo nel processo orale e sulla percezione sensoriale è ancora carente (Stokes J. R., 2013). Le sue proprietà reologiche, idratanti ed enzimatiche influenzano drasticamente la masticabilità degli alimenti solidi, le proprietà reologiche del bolo e le quindi la texture percepita durante il processo orale. Recenti studi sulla reologia della saliva mostrano che si tratta di un fluido biologico altamente strutturato, infatti presenta uno *yield stress* diverso da zero e $G' > G''$ (comportamento viscoelastico solid-like), simili ad un *gel*. Questo comportamento è dovuto all'assorbimento di alcune proteine della saliva all'interfaccia aria/saliva dove si forma il reticolo che ingloba l'alimento. A causa degli spessori estremamente sottili coinvolti nel processo orale, le proprietà di interfaccia (tensione superficiale) della saliva sono dominanti rispetto alle sue proprietà reologiche di bulk (Stokes & Davies, 2007); (Rossetti D. Yakubov G.E. Stokes J.R. & G.G., 2008). Aggiungendo una piccola quantità di tensioattivi o di olio di silicone a bassa viscosità nella superficie di interfaccia di alcuni campioni di saliva (Stokes J. R., 2013) riuscì a minimizzare l'adsorbimento delle proteine e di studiare il comportamento reologico senza artefatti dovuti alle componenti di attrito. In queste condizioni la saliva perdeva la caratteristica proprietà di fluido altamente strutturato (non era possibile misurare uno *yield stress* significativo) ma manifestava le sue proprietà reologiche di fluido “*shear-thinning*”, per il quale la viscosità

stazionaria diminuisce all'aumentare del gradiente di velocità applicato, e allo stesso tempo un elevato valore di *normal stress* (N_1). Le proprietà viscoelastiche della saliva sono simili a quelle di una soluzione di polisaccaridi (polimeri), ma diversamente dai polisaccaridi e dai polielettroliti, mostra un'elevata elasticità rispetto ad altri fluidi con viscosità simile viscosità stazionaria [Stokes e Devies 2007]. La reologia della saliva dipende dalla sua composizione e quindi dal tipo di stimolazione per la sua secrezione. A seguito di una stimolazione acida (attraverso una soluzione di acido citrico) ed una meccanica (attraverso l'impiego di una gomma priva di sapore ed aroma) vengono prodotte simili quantità di saliva e identiche curve di flusso viscosi, ma la saliva ottenuta per stimolazione acida risulta essere estremamente elastica rispetto quella ottenuta per stimolazione meccanica che si presenta relativamente acquosa ed inelastica. L'elasticità relativamente elevata della saliva è conferita dalla presenza di una di una glicoproteina ad alto peso molecolare, la mucina, che forma clusters a seguito dell'aggregazione end-to-end [Stokes e Devis 2007].

Diversi autori hanno utilizzato un reometro rotazionale per analizzare la resistenza allo scorrimento in condizioni stazionarie di sforzo di taglio e misurare la viscosità stazionaria di matrici alimentari con l'obiettivo di ricercarne le correlazioni con la percezione sensoriale della texture. L'approccio reologico strumentale consiste nell'impiegare geometrie fisiche che confinano lo "spessore" di materiale da esaminare, allo scopo di esaminare le sue proprietà di bulk, e cioè le proprietà di struttura che si estendono su una scala dimensionale non inferiore a 100 micron. Analogamente alla geometria utilizzata nel reometro, lingua e palato possono essere considerati come due superfici piane che fissano lo spessore del bolo sottoposto a scorrimento in diverse condizioni di sforzo di taglio e gradiente di velocità. Sotto tale semplificazione e addensando diverse salse con idro-colloidi, Wood (1968) dimostrò che il gradiente di velocità più probabile durante la manipolazione di liquidi Newtoniani nella bocca è pari a $50s^{-1}$. Shama e Sherman (1973) valutarono un gran numero di alimenti fluidi e semisolidi utilizzando test comparativi accoppiati (sensoriale e strumentali) per caratteristiche di flusso molto simili tra loro. Gli autori hanno stimato gli *shear stress* e gli *shear rate* operativi. Anche se i risultati da loro ottenuti erano in accordo con quelli determinati da Wood (1968), Sharma e Sherman conclusero che il gradiente di velocità (*shear rate*) realizzato all'interno del cavo orale varia da $10s^{-1}$ a sopra i $1000s^{-1}$ e che la relazione tra livello di viscosità percepita (*thickness*) e il logaritmo della viscosità strumentale è lineare per fluidi Newtoniani. Gli stessi autori dimostrarono che la valutazione della *thickness* di liquidi a bassa viscosità ($<70mPa*s$) richiede il controllo nell'applicazione di uno sforzo pari a 10Pa; mentre, per la valutazione della *thickness* di fluidi più viscosi

richiede il controllo dell'applicazione di un gradiente di velocità di circa 10s^{-1} . (Morris & Taylor, 1982) studiarono un numeroso set di campioni liquidi con un'ampia risposta reologica che includeva quella Newtoniana, shear-thinning (viscosità diminuisce con il gradiente di velocità) e weak-gel (in un gel debole la componente elastica è superiore a quella viscosa per gradienti di velocità al di sotto di un livello di cross-over oltre il quale la componente elastica è inferiore a quella viscosa). Questi autori confermarono l'adeguatezza dell'approccio seguito da Shama e Sherman (1973) solo per i liquidi Newtoniani. Per liquidi con caratteristiche weak-gel, la thickness percepita era sottostimata se confrontata alla viscosità misurata strumentalmente in condizioni di gradiente di velocità applicato pari a 50s^{-1} ; mentre, tale comparazione migliorava se la misura della viscosità era riferibile a 10s^{-1} . Migliori correlazioni sono state trovate misurando la viscosità complessa ottenuta da misure di deformazione dinamica (in condizioni non distruttive) eseguita ad una frequenza di 50rad/s (Richardson RK., 1989). È bene sottolineare che per molti fluidi e soluzioni la viscosità complessa è molto simile alla viscosità stazionaria (misurata in condizioni sforzo di taglio o gradiente di velocità stazionari), ma per i fluidi altamente strutturati e per i solidi soffici questa relazione non è più valida. (Richardson RK., 1989) non avendo chiaro il motivo per il quale la misura strumentale registrata in condizioni di piccole deformazioni dovrebbe essere equivalente alla risposta sensoriale durante il processo orale che probabilmente coinvolge grandi deformazioni, tentarono comunque di fornire una spiegazione. Ipotizzarono che le misure dinamiche riflettono lo stato imperturbato della struttura reticolata del gel debole esaminato e potrebbero essere in relazione al massimo valore di sforzo richiesto per rompere il reticolo durante il processo orale che richiede l'applicazione di un gradiente di velocità costante.

(Cutler, et al., 1983) hanno confrontato la viscosità del flusso di taglio di soluzioni di xantan, ketchup e altri materiali fluidi con lo spessore sensoriale percepito e hanno riferito che la viscosità sensoriale era meglio correlata con la viscosità di taglio a 10s^{-1} ma scarsamente correlata con quelle misurate a 50s^{-1} . Ciò è stato ripreso da (Akhtar, et al., 2005) che hanno riferito che la viscosità apparente a 50s^{-1} è insufficiente per descrivere lo spessore percepito o la cremosità delle emulsioni del modello. Molto recentemente, i colleghi dell'Università di Nottingham hanno scoperto che lo spessore percepito dei fluidi addizionati con idrocolloidali erano correlati alla viscosità misurata strumentalmente alla velocità di taglio intorno a 500s^{-1} , sebbene il sapore percepito (salinità) fosse correlato inversamente alla viscosità misurata al di sotto di 50s^{-1} (Koliandris, et al., 2010).

Tuttavia, esperimenti condotti da (Dickie A.M., 1982) mostrarono un basso coefficiente di correlazione tra lo stress massimo e la thickness di fluidi strutturati. (E.R., 1989) attraverso misure della viscosità complessa ad una frequenza di 50rad/s, mostrarono che le correlazioni da loro trovate erano chiaramente correlate all'attività muscolare della lingua rilevata attraverso elettromiografia.

Sulla base dei dati di letteratura, dunque, per alimenti liquidi (viscosità stazionaria < 100mPas) si può ritenere ragionevole correlare la thickness alla viscosità misurata al gradiente di velocità pari a $50s^{-1}$ (condizioni stazionarie) oppure 50rad/s (condizioni dinamiche). Per la valutazione sensoriale dei fluidi non-Newtoniani è sconsigliabile considerare un solo valore di shear rate. Molti fluidi possono mostrare una forte dipendenza della viscosità dal gradiente di velocità applicato: la valutazione della thickness in questi casi potrebbe essere seriamente compromessa non riuscendo a riprodurre il necessario controllo fine della variazione del gradiente di velocità all'interno del cavo orale.

In uno studio relativamente recente, (Ryo Ishida, 2002) hanno stimato le velocità associate ai movimenti della lingua durante il processo orale di liquidi: la velocità media della lingua è di 10.34mm/s (+/- 2,1mm/s) variabile tra gli estremi di 300mm/s e 200mm/s. Per ottenere un gradiente di velocità di circa $50s^{-1}$ è necessario che la lingua faccia scorrere un film di spessore di circa 200 μ m (distanza tra lingua e palato). Per una velocità della lingua pari a 200mm/s in questo caso sarebbe richiesta uno spessore di liquido pari a 5mm per avere un gradiente di velocità di $50s^{-1}$; se lo spessore di liquido fosse di 200 μ m, si realizzerebbe un gradiente di velocità 1000 s^{-1} . Da quando la lingua inizia a premere contro il palato nella direzione normale, lo spessore del film di alimento e saliva cambia continuamente, determinando cambiamenti continui nel gradiente di velocità realizzato e nella resistenza allo scorrimento soprattutto dei liquidi non Newtoniani.

Quando l'alimento liquido si dispone in strato sottile tra lingua e palato, impedendone il contatto, si registrano gradienti di velocità molto alti anche oltre 1000 s^{-1} . Questo shear-rate non è rilevante per la percezione iniziale della viscosità (thickness), ma può generare uno stimolo significativo per la percezione sensoriale residua di attributi della texture (inclusi la *mouthfeel*) che richiedono un trasferimento di massa verso i recettori del cavo oro-faringeo. La limitazione dell'approccio reologico per gli studi sulla thickness e i risultati contraddittori sulle velocità di taglio rilevate dall'esperienza orale possono essere dovuti a fattori soggettivi e alle capacità individuali di percepire simultaneamente stimoli derivanti dal complesso meccanismo di rilassamento strutturale e di continua trasformazione dell'alimento in bocca.

La limitazione dell'approccio reologico per gli studi sulla consistenza diventa più evidente per alimenti fluidi e semifluidi in cui le caratteristiche strutturali sono più rilevanti per una combinazione di flusso del fluido (reologia) e proprietà di superficie. Cremosità, levigatezza, consistenza, scivolosità, ecc. Sono i tipici esempi di caratteristiche tessiturali che non potrebbero essere spiegate in modo soddisfacente con un semplice test di reologia (limiti della TPA).

L'analisi strumentale delle proprietà reologiche delle matrici alimentari liquide, semi-liquide, semi-solidi e solide è certamente un valido approccio ma da solo non può descrivere in maniera esaustiva la percezione della texture in bocca. Durante la preparazione e deglutizione del bolo, infatti, si verificano cambiamenti distruttivi nella struttura dovuti alla deformazione e al flusso (oggetto di studio della reologia), ma anche alla riduzione delle dimensioni delle particelle sospese o alla ristrutturazione di eventuali fasi eterogenee, miscelazione e idratazione con la saliva, a cambiamenti di temperatura.

Quando il bolo è pronto alla deglutizione, ad esempio, le proprietà di struttura dominanti non sono più le proprietà reologiche (di bulk) ma le proprietà di superficie (ad esempio il coefficiente di frizione) che ne determinano la capacità di aderire e scorrere rispetto alle superfici del cavo oro-faringeo e esofageo. Tali proprietà di struttura sono oggetto di misura delle tecniche tribologiche. La tribologia è la scienza che studia le interazioni tra due superfici prendendo in considerazione l'attrito, l'usura e la lubrificazione. Un breve esame della bocca rivela l'ovvia importanza della tribologia e della lubrificazione per la manipolazione orale. In primo luogo, un processo alimentare implica una serie di interazioni tra superfici in movimento, inclusi il contatto tra gli incisivi, tra lingua e palato, tra lingua e denti e tra lingua e cibo e il movimento delle labbra.

Di queste superfici interagenti, l'interazione di maggior rilevanza è quella tra la lingua e il cibo. In secondo luogo, i recettori e i sensori situati sulle superfici orali rilevano i vari stimoli fisici (meccanici) e / o chimici tramite vari movimenti e contatti tra le superfici interagenti. A riposo, la superficie orale è rivestita da un sottile strato di saliva, che protegge dagli attacchi microbici e dall'irritazione superficiale (Humphrey e Williamson, 2001). La saliva è un liquido incolore, opalescente, a pH neutro, filante a causa della presenza di circa 2 g/l di mucina (glicoproteina ad alto peso molecolare, il quale si crede che sia responsabile della lubrificazione- Cardenas, Elofsson e Lindh, 2007), che contiene tra le altre cose costituenti minerali ed organici, α -amilasi ed enzimi. Durante il pasto, il mix che si crea tra cibo e saliva viene manipolato tra la lingua e il palato e la sensazione che scaturisce è un'importante parte dell'esperienza sensoriale. Il parametro principale per un test tribologico è il coefficiente di

attrito, calcolato come rapporto tra la forza di attrito misurato e il carico normale. Il coefficiente di attrito è una costante dipendente solo dalle proprietà di contatto delle superfici quando sono in movimento a secco, ma potrebbero variare notevolmente in base al carico superficiale e alla viscosità del fluido quando un sottile strato di esso è intrappolato tra le due superfici (Bongaerts, 2007). In questo caso, le superfici in movimento relativo potrebbero trovarsi a stretto contatto, dove le loro irregolarità e rugosità potrebbero causare il bloccaggio delle superfici e provocare una grave usura superficiale e un elevato coefficiente di attrito. Quando due superfici in movimento relativo sono completamente separate da un sottile strato di fluido, entra in gioco un regime di lubrificazione idrodinamica. In questo caso, non c'è usura superficiale e l'attrito aumenta a causa della forza di trascinamento del fluido.

Tra il regime dello strato limite e lo strato idrodinamico, domina un regime misto, dove le due superfici sono separate da un sottile strato di fluido. Questo regime fornisce un effetto di lubrificazione massimo e il coefficiente di attrito superficiale ha un valore minimo alla giunzione tra regime misto e idrodinamico (de Vicente, Spikes e Stokes, 2006). La figura 23 mostra una tipica curva del coefficiente di attrito (curva di Stribeck), dove esso viene mostrato nelle tre diverse condizioni.

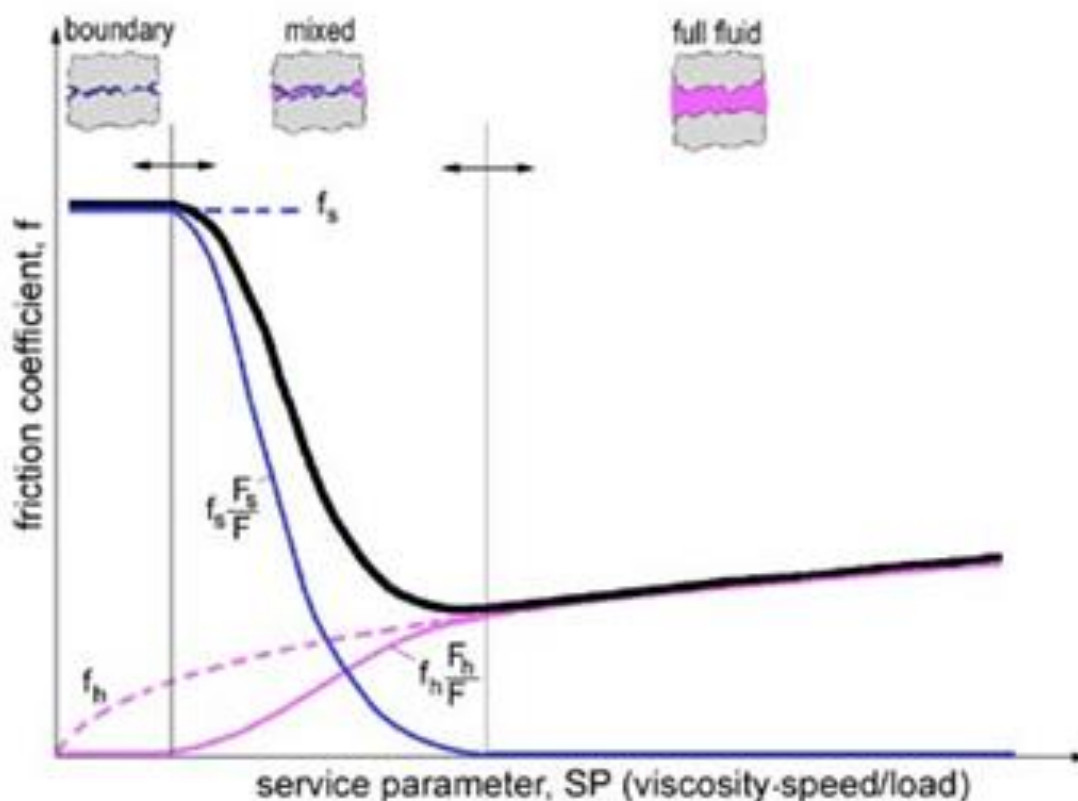


Figura 23 *Variazione del coefficiente di attrito nei tre regimi di flusso dominanti*

Il regime di lubrificazione dominante durante la lavorazione orale dipenderà dal tipo di alimento consumato e dal tempo di elaborazione. In alcuni casi possono verificarsi tutti e tre i regimi (regime 1- contatto completo tra le due superfici, es. lingua e palato- regime 2 è un regime misto - regime 3 il fluido lubrificante assolve pianamente la sua funzione interfacciandosi alle due superfici) durante il processo alimentare. La lubrificazione di alimenti fluidi come le bevande può inizialmente essere governata dalle leggi idrodinamica, dove domina principalmente la viscosità o reologia del fluido in quanto prevalgono le proprietà di bulk. Man mano che viene consumato, lo spessore della bevanda diminuisce e si forma una pellicola tra lingua e palato e qui entra in gioco il regime di lubrificazione limite.

Durante la lubrificazione di alimenti fluidi più densi è più probabile che si inneschi il regime idrodinamico misto a causa della difficoltà di spostare un film ad alta viscosità tra due superfici interagenti. Uno studio condotto (Malone, 2003) ha mostrato alcuni dati sensoriali limitati per i fluidi ispessiti, indicando che le percezioni sensoriali di levigatezza e scivolosità erano dipendenti dall'attrito misurato nel regime di lubrificazione mista.

Nel 1977 grazie agli studi di (Kokini, 1997) (insieme a Kadane e Cussler) mise appunto un modello per il quale la struttura dei fluidi poteva essere descritta dal fattore di attrito o dal fattore viscoso o la loro combinazione. È stato dimostrato inoltre che la sensazione di scorrevolezza è correlata al reciproco della forza di attrito tra le superfici orali, che la scivolosità sensoriale è correlata al reciproco della somma della forza viscosa e forza di attrito e che la cremosità sensoriale si può comparare a un effetto combinato di spessore e levigatezza.

Questi cambiamenti tra i vari meccanismi di viscosità e lubrificazioni dimostrano la variabilità delle percezioni sensoriali. Gli alimenti sono composti da più fasi (proteine e lipidi) che interagiscono tra loro all'interno della struttura e influenzano la risposta tribologica in modi specifici. Come è stato dimostrato dallo studio condotto da Adams et al. (Adams, 2007) uno strato sottile di olio (o goccioline di olio) persiste per 30 s in corrispondenza della superficie della lingua dopo l'elaborazione orale. Ovviamente, questo strato sottile altererà il comportamento di lubrificazione tra la lingua e il palato duro, influenzato anche dalle dimensioni delle goccioline di olio. (Rolls, 2011) ha esaminato il cervello durante il processo di riconoscimento della percezione orale del grasso, e ha rilevato che la risposta celebrale alla percezione dell'olio di silicone insapore e di olio di paraffina è uguale a quella del grasso cremoso. Si cerca tutt'ora di sviluppare e comprendere i principi

guida che governano le proprietà della tribologia orale utilizzando substrati modello, conoscendone la chimica superficiale, la rugosità e ad elasticità controllate (Bongaerts, 2007). Queste sono particolarmente importanti per chiarire il comportamento della lubrificazione degli alimenti altamente complessi che hanno più componenti e fasi, che possono influenzare la risposta tribologica in modi specifici.

Attualmente, l'unico modo per poter descrivere e rilevare tutti gli attributi della texture è attraverso l'analisi sensoriale, dove i giudici sono addestrati a quantificare determinati attributi specifici. Tuttavia, le misurazioni strumentali sono utilizzate maggiormente rispetto alle valutazioni sensoriali sia per applicazioni commerciali che di ricerca perché gli strumenti sono più convenienti da usare, ampiamente disponibili, tendono a fornire valori coerenti se usati da persone diverse (spesso non addestrate) e sono meno costosi dei pannel sensoriali.

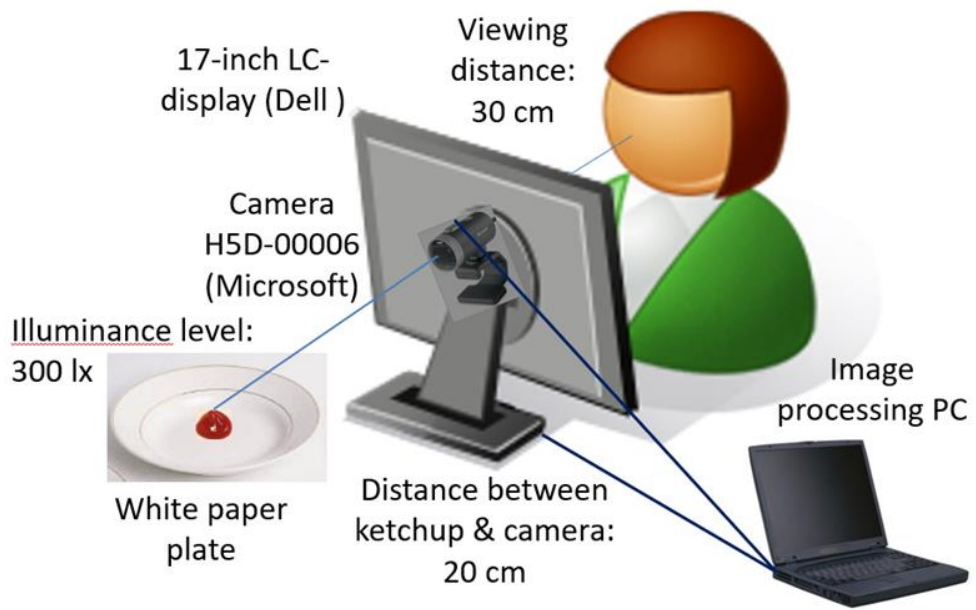
CASO STUDIO #1 SOLUZIONI MODELLO

(Katsunori, 2013) et al. hanno sviluppato un sistema di Realtà Aumentata (AR) in grado di modificare in modo virtuale il grado di consistenza del cibo in tempo reale per indagare come la percezione visiva dell'aspetto del cibo (in questo caso ketchup) influenza la percezione del gusto e del sapore. L'alimento è stato posto davanti ai partecipanti al panel sensoriale utilizzando un piatto a loro visibile solo attraverso lo schermo (analisi visiva indiretta) di un personal computer dotato di videocamere che ne consentiva l'acquisizione digitale della texture, l'incremento della scala e una migliore percezione dei dettagli (Fig. 24).

La stessa porzione di ketchup nel piatto era presentata agli assaggiatori dopo essere stato illuminato in modo uniforme e dopo che il profilo dell'istogramma dei colori era stato opportunamente modificato per alterarne la percezione visiva della consistenza. Prima dell'assaggio, ai partecipanti era chiesto di osservare in tempo reale la propria mano che guidava un cucchiaino durante l'immersione nel ketchup. Questo passaggio aveva la finalità non dichiarata di indurre i meccanismi psicologici di associazione mentale degli stimoli rilevati nelle due esperienze sensoriali. In seguito, ai partecipanti era richiesto di attribuire un punteggio ad alcuni attributi del gusto (rapporto di liquidità/solidità, acidità, dolcezza) e al grado di piacere (deliziosità) utilizzando scale non graduate. I risultati hanno mostrato che all'aumento virtuale (ottenuto attraverso la variazione numerica dei livelli dell'istogramma di colore e luminosità) della consistenza percepita visivamente corrisponde un apparente aumento della percezione gustativa della consistenza (espressa in termini di rapporto liquidità/solidità). Per quanto riguarda il grado di piacere (livello di deliziosità) riferibile alla consistenza percepita visivamente e in bocca, i risultati hanno evidenziato comportamenti apparentemente contrattatori. In particolare, alcuni soggetti associano maggior gradimento (alla vista e al consumo) ai campioni classificati come "campioni solidi" (cioè con maggiore consistenza percepita visivamente). Altri soggetti associano il maggior gradimento ai campioni classificati come "campioni liquidi" (cioè con una minore viscosità percepita visivamente). Inoltre, la risposta sensoriale di un assaggiatore può evidenziare correlazioni positive e negative tra grado di piacere riferibile alla consistenza percepita visivamente e al

grado di piacere riferibile alla consistenza percepita in bocca, in funzione dello specifico grado di piacere per la consistenza percepita visivamente. La correlazione positiva è stata attribuita all'effetto di confusione legato alla falsa aspettativa indotta dalla percezione visiva della consistenza; mentre, la correlazione negativa è stata attribuita all'effetto illusorio noto come "illusione dimensione-peso". Recenti studi focalizzati sui complessi meccanismi di condizionamento psicologico vissuto durante un'esperienza sensoriale finalizzata alla valutazione visiva del peso di due oggetti aventi realmente stesso peso ma dimensioni diverse, hanno evidenziato la attribuito a meccanismi psicologici non legati all'esperienza pregressa del soggetto (Elizabeth J. Saccone, 2019).

Pertanto, la valutazione del grado di piacere al consumo di un alimento deve essere considerato il risultato non solo dell'esperienza sensoriale degli stimoli derivanti dall'osservazione e manipolazione dell'alimento, ma anche di complessi meccanismi psicologici non legati all'esperienza sensoriale e messi in atto a livello individuale nell'associare significato e valore all'alimento esaminato. Un famoso detto popolare recita "De gustibus non disputandum est".



Real-time Image Processing

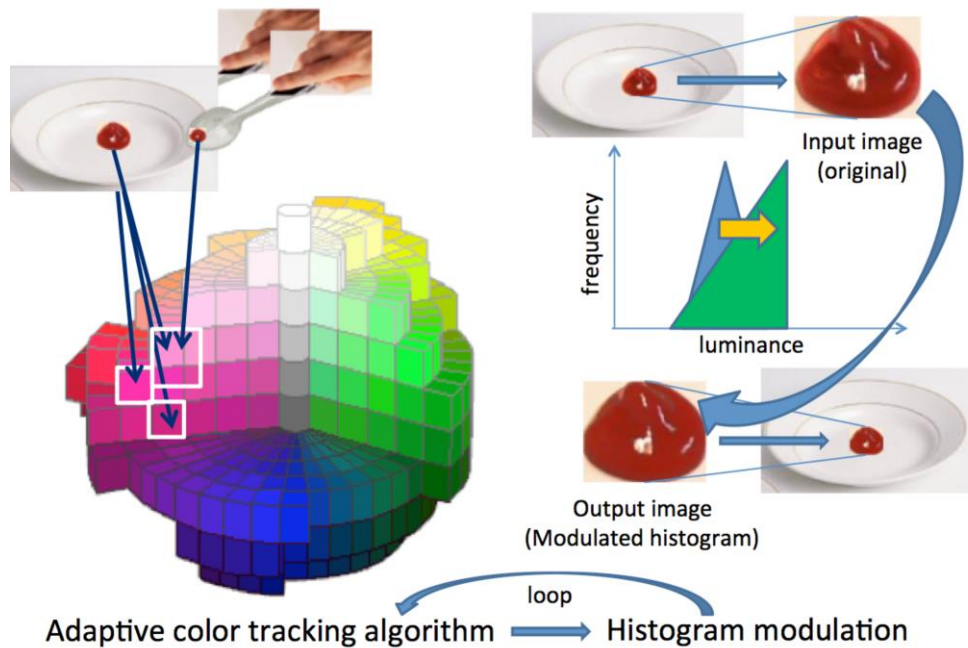


Figura 24 Test di realtà aumentata sulla percezione visiva della consistenza (Katsunori)

Experimental condition

- 3 kinds of ketchup image displayed

mean luminance: 6.9 cd/m^2

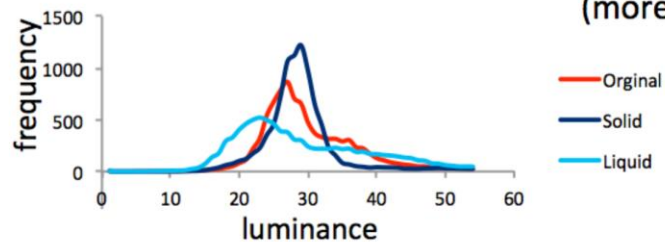
mean CIE xy-chromaticities (0.585, 0.343)



lower skewness
(more liquid)

original

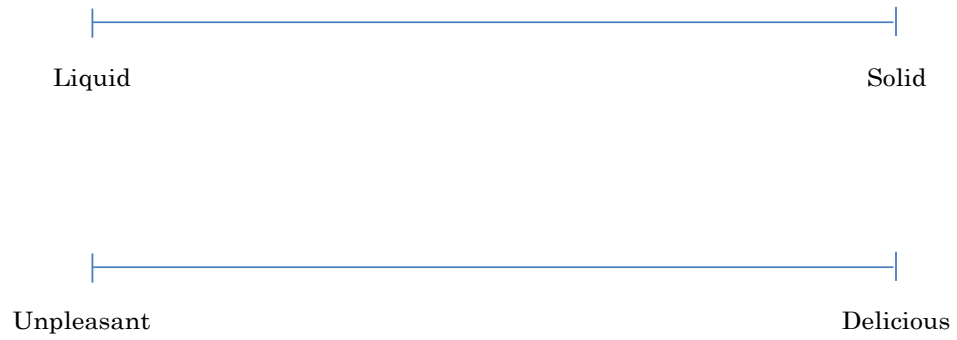
higher skewness
(more solid)



- 11 Participants

9 females + 2 males (mean age: 26.5)

Appearance

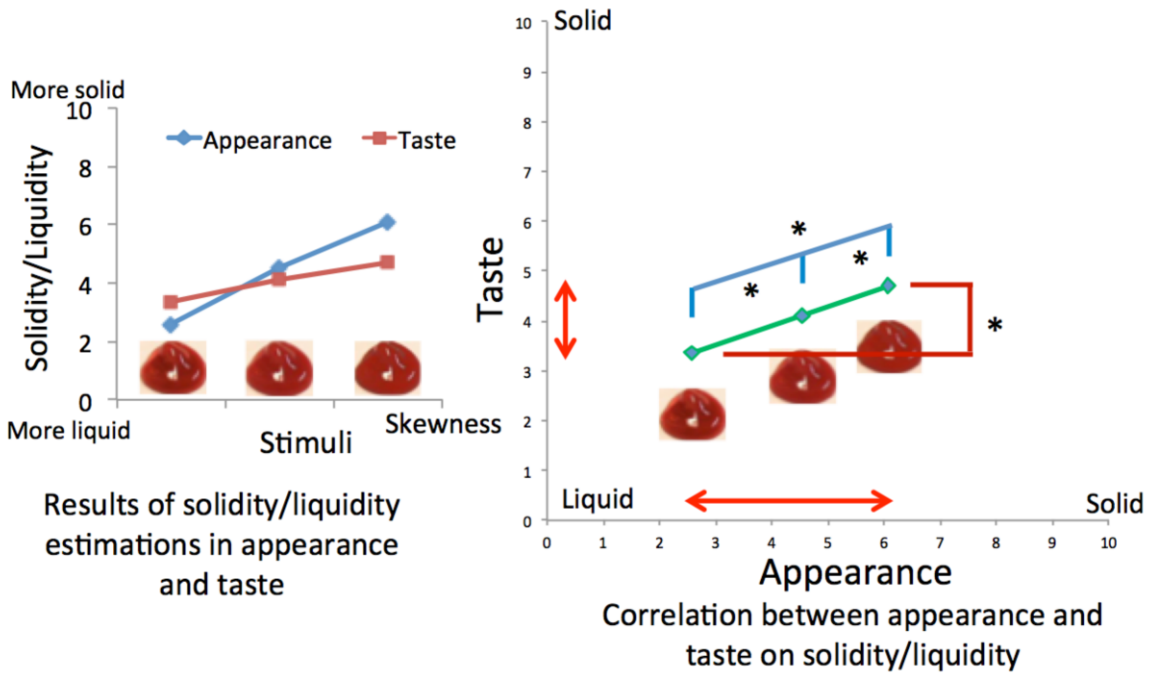


Tastes



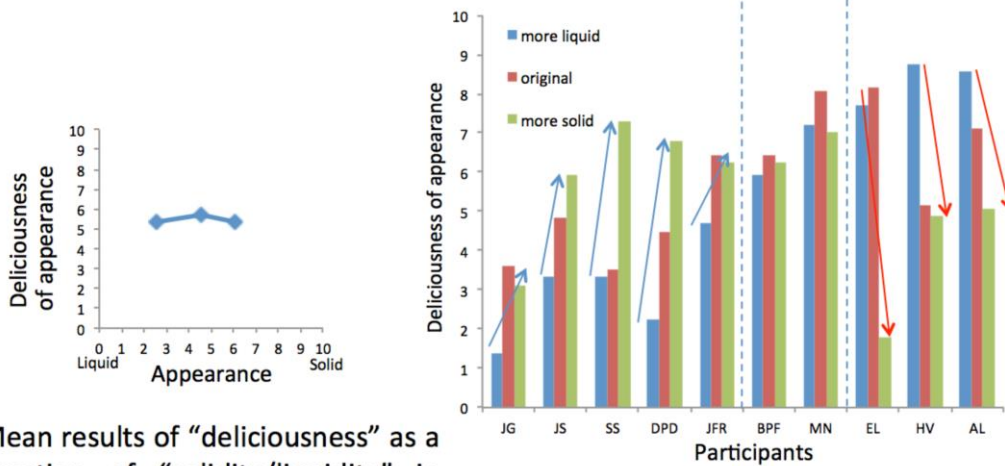
Figura 25 Scale utilizzate durante la valutazione sensoriale

Results (Solidity/Liquidity)



Participants thought that they were tasting “different” tomato ketchups despite the fact that the only difference was in terms of the visual texture (not color).

Results (Deliciousness of appearance)



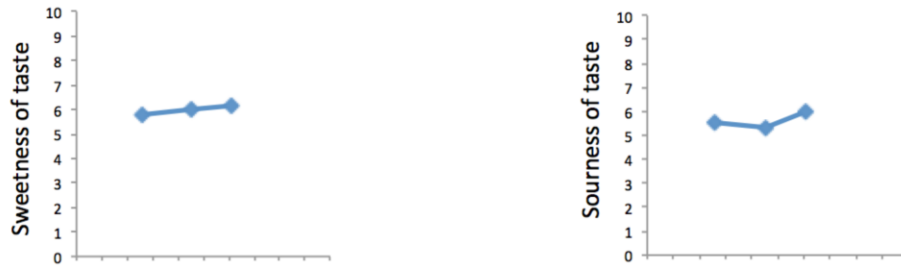
Mean results of “deliciousness” as a function of “solidity/liquidity” in appearance

Individual results of “deliciousness” in appearance for 3 kinds of visual stimuli

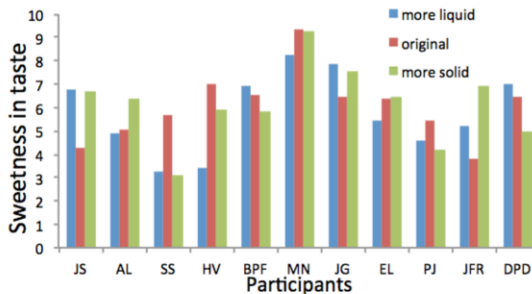
Mean results seem show no effects of visual texture to deliciousness in appearance. However, ...

Some participants prefer solid ketchup while others ones prefer liquid ketchup

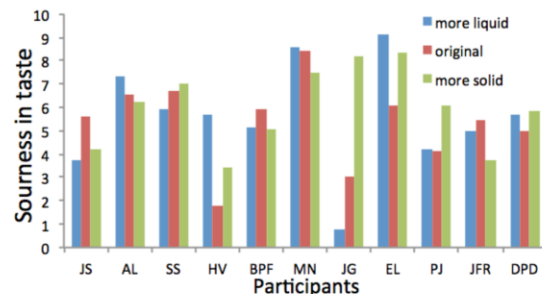
Results (Sweetness & Sourness of taste)



No effect of visual texture to sweetness or sourness estimation in taste.



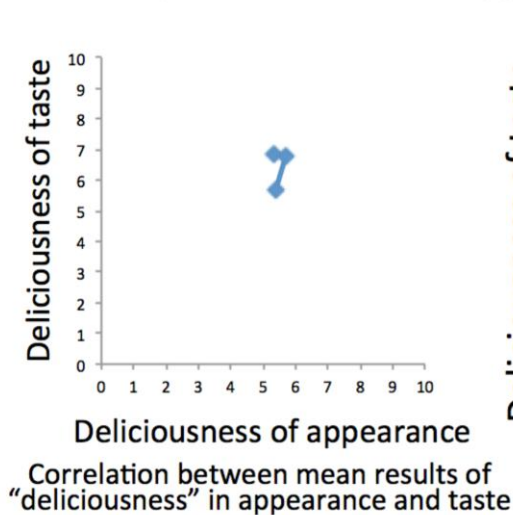
Individual results of "sweetness" in appearance for 3 kinds of visual stimuli



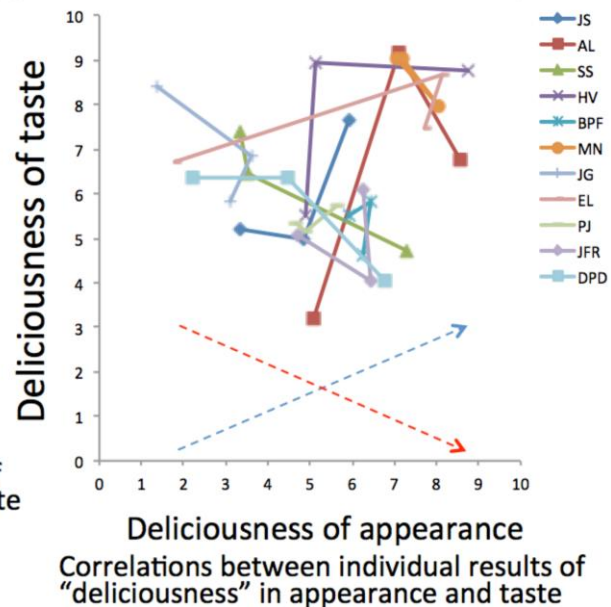
Individual results of "sourness" in appearance for 3 kinds of visual stimuli

Results

(Correlation between appearance and taste on deliciousness)



Correlation between mean results of "deliciousness" in appearance and taste



Correlations between individual results of "deliciousness" in appearance and taste

There are positive or negative correlations between appearance & taste on "deliciousness" estimation in most participants.

- **Positive correlation:** averaging effect (bias effect)
- **Negative correlation:** contrast effect (like Size-Weight Illusion)

CASO STUDIO #2 CREMA DI CAFFÈ

Sono diversi gli stimoli sensoriali rilevabili nelle diverse modalità esperienziali della valutazione sensoriale della texture (Annelies E. Blok, 2020). Ad esempio, la cremosità percepita durante lo spatolamento manuale su una superficie (esperienza attiva, aptica) produce percezione di maggiore cremosità rispetto alla cremosità percepita durante lo scorrimento del liquido tra le dita (esperienza passiva, tattile). Numerosi studi hanno accertato che un incremento della viscosità materiale induce la percezione di una maggiore cremosità del prodotto. Altri studi hanno verificato che un aumento di grasso e proteine induce un incremento delle proprietà di scivolamento (basso coefficiente di frizione). Tuttavia, l'incremento del contenuto di grasso e proteine non ha solo l'effetto di ridurre il coefficiente di frizione ma anche quello di incrementare la viscosità. Pertanto, questi studi non consentono di attribuire la diversa percezione della cremosità alle proprietà reologiche piuttosto che a quelle tribologiche. La percezione orale della viscosità di liquidi addensati appare più elevata di quella rilevata nell'esperienza visiva e aptica. La differenza della percezione sensoriale dello stesso attributo della texture così come rilevato nelle diverse modalità esperienziali (visiva, aptica, orale) è stata attribuita alla diversa distribuzione delle tipologie funzionali dei diversi meccanorecettori coinvolti nelle specifiche esperienze sensoriali. I meccanorecettori presenti sulla pelle e nel cavo orale sono di due tipi, cioè a lento (SA) e a rapido (RA) adattamento agli stimoli rilevati durante la sollecitazione del materiale. La lingua e le dita sono caratterizzati da una maggiore prevalenza di meccanorecettori a rapido adattamento (RA). Mentre una prevalenza di meccanorecettori di tipo lento è riferibile agli altri distretti del corpo.

Alcuni ricercatori hanno realizzato uno studio per determinare il reale contributo delle proprietà reologiche (viscosità) e proprietà tribologiche (coefficiente di frizione) sulla percezione sensoriale di alcune proprietà della texture (cremosità, viscosità, scivolosità) durante l'esperienza orale e aptica (Annelies E. Blok, 2020). La cremosità è un attributo sensoriale che dipende da diverse proprietà di struttura, incluse la viscosità e il coefficiente di frizione. Gli autori hanno messo a confronto tre tipologie di ice coffe che differiscono per

la viscosità e proprietà di frizione. In particolare, i campioni erano indentificati rispettivamente come “bassa viscosità – alta frizione (LV-HF)”, “bassa viscosità – bassa frizione (LV-LF)”, e “alta viscosità – bassa frizione (HV-LF)”.

Al fine di incrementare il livello iniziale della viscosità, ai campioni di ice coffee era addizionata la maltodestrina (idrocolloide) riuscendo a raggiungere livelli di viscosità (10 mPa s at 100 s⁻¹), circa 2.5 volte superiore rispetto ai campioni originali (a bassa viscosità) (4 mPa s at 100 s⁻¹). Il coefficiente di frizione dei campioni iniziali, invece, era ridotto aggiungendo polietilenglicole (PEG, M_w 6000) fino a raggiungere livelli circa 25% più bassi rispetto ai campioni iniziali (ad alta frizione, LV-HF). La valutazione sensoriale degli attributi della texture è stata eseguita da 47 assaggiatori non addestrati. Allo scopo di confrontare i risultati derivanti dalle due modalità sensoriali, cioè attraverso l’esperienza aptica e l’esperienza orale, sono stati seguiti due differenti strategie per ottenere informazioni sensoriali dai giudici. Il primo metodo è basato sulla scelta forzata tra due possibilità (2-AFC): agli assaggiatori era chiesto di confrontare due campioni rispetto ad un materiale di riferimento e di esprimere una scelta del campione con maggiore intensità rispetto all’attributo sensoriale di interesse). Il secondo metodo era basato sull’ordinamento quantitativo (rank-rating test): in questo caso agli assaggiatori era chiesto di metter in ordine (classificare) i tre campioni rispetto all’intensità percepita per lo specifico attributo della texture, utilizzando una scala non strutturata. In particolare, le proprietà di viscosità sensoriale e scivolosità sono state analizzate con esperienza aptica e orale; mentre, la cremosità è stata valutata con esperienza orale. I risultati derivanti da entrambe i metodi sensoriali (2-AFC e rank-rating) evidenziavano in modo coerente che i campioni caratterizzati da alta viscosità e bassa frizione (HV-LF) erano percepiti con la più alta cremosità, viscosità sensoriale e scivolosità sia quando erano valutati con l’esperienza orale sia attraverso l’esperienza aptica. I campioni caratterizzati da bassa viscosità e bassa frizione erano percepiti nella esperienza orale come i meno cremosi e viscosi, mentre erano percepiti come i più scivolosi durante l’esperienza aptica. L’attributo di cremosità era significativamente correlato alla viscosità sensoriale piuttosto che alla scivolosità. La valutazione della viscosità sensoriale nell’esperienza orale e aptica evidenziava risultati coerenti tra loro. L’attributo di scivolosità era percepito in modo diverso nelle due esperienze (orale e aptica) in funzione del prodotto esaminato. Gli autori concludono che la viscosità materiale incrementa la percezione sensoriale della cremosità, mentre l’aumento di

scivolosità non è necessariamente sufficiente per incrementare la percezione della cremosità dei campioni di ice coffe. Confermando che le proprietà reologiche materiali giocano un ruolo dominante sulle proprietà tribologiche nel condizionare la percezione sensoriale della cremosità.

Le differenze di viscosità tra i campioni (rapporto superiore a 2,5) supera la soglia differenziale (JND) che in letteratura si ritiene sufficiente per discriminare sensorialmente la viscosità dei liquidi (Camacho et al, 2015). Tuttavia, le differenze di coefficiente di frizione realizzate in questo studio sono piuttosto limitate (rapporto circa 1.3) e potrebbe essere inferiore alla soglia differenziale (JND) per la percezione sensoriale delle proprietà di scivolamento. Uno dei limiti di questo studio risiede nell'aver impiegato il PEG come additivo per modificare le proprietà di frizione. Questo composto può essere impiegato per usi alimentari solo in quantità ridotte: per tale ragione le quantità impiegate in questo studio hanno permesso di esplorare solo il regime misto (mixture regime) e non hanno permesso di esplorare le proprietà di frizione nel regime limite (boundary regime) dove effettivamente predominano le proprietà tribologiche su quelle reologiche. Un secondo limite riguarda il fatto che le proprietà di frizione dipendono strettamente dalla particolare superficie su cui è misurato il coefficiente di frizione. Tale informazione non può essere generalizzata e i risultati non possono essere sempre utilizzati a fini comparativi con altri studi. Tanto meno possono rappresentare il reale regime tribologico nella esperienza orale della valutazione della texture.

		Definition/ instruction	Reference products	
			Low intensity	High intensity
Oral	Creaminess	“The degree to which you experience a silky, rich, full feeling in your mouth”	Skim milk	Full-fat milk
	Thickness	“How easily does the product flow in your mouth?”	Plain iced coffee	Iced coffee + 50% maltodextrin
	Slipperiness	“How easily does your tongue move over your palate when you consume the product?”	Water	Olive oil
Haptic	Thickness	“Evaluate the thickness of the product by rubbing a small amount between thumb and index finger”	Plain iced coffee	Iced coffee + 50% maltodextrin
	Slipperiness	“Evaluate the slipperiness of the product by rubbing a small amount between thumb and index finger”	Water	Aqueous PEG solution ($M_w 4 \times 10^6$, 1.0 g L ⁻¹)

Tabella 16 Definizione degli attributi sensoriali della texture e dei prodotti di riferimento

	wt% MD	wt% PEG	Shear viscosity η (mPa s)			Friction coefficient μ			Exponent b
			1 s^{-1}	10 s^{-1}	100 s^{-1}	1 mm s^{-1}	10 mm s^{-1}	100 mm s^{-1}	
LV-HF	16.8	—	5.4 ± 0.1	4.6 ± 0.1	3.9 ± 0.0	0.63 ± 0.05	0.39 ± 0.02	0.39 ± 0.03	-0.494
LV-LF	—	7.0	5.6 ± 0.2	4.7 ± 0.1	4.0 ± 0.0	0.56 ± 0.05	0.32 ± 0.04	0.30 ± 0.03	-0.457
HV-LF	30.0	—	13.3 ± 0.1	11.8 ± 0.1	10.5 ± 0.1	0.55 ± 0.04	0.31 ± 0.02	0.18 ± 0.02	-0.699

Tabella 17 Livelli di viscosità e frizione materiali dei campioni di ice coffee valutati attraverso misure reologiche e tribologiche strumentali. Le differenze di viscosità e le differenze di frizione tra i campioni ad alto e basso livello risultano superiori alle corrispondenti soglie sensoriali differenziali (JND) riportate in letteratura per i liquidi viscosi (Camacho et al., 2015) e per i liquidi con elevato coefficiente di frizione Zhong et al., 2018), rispettivamente.

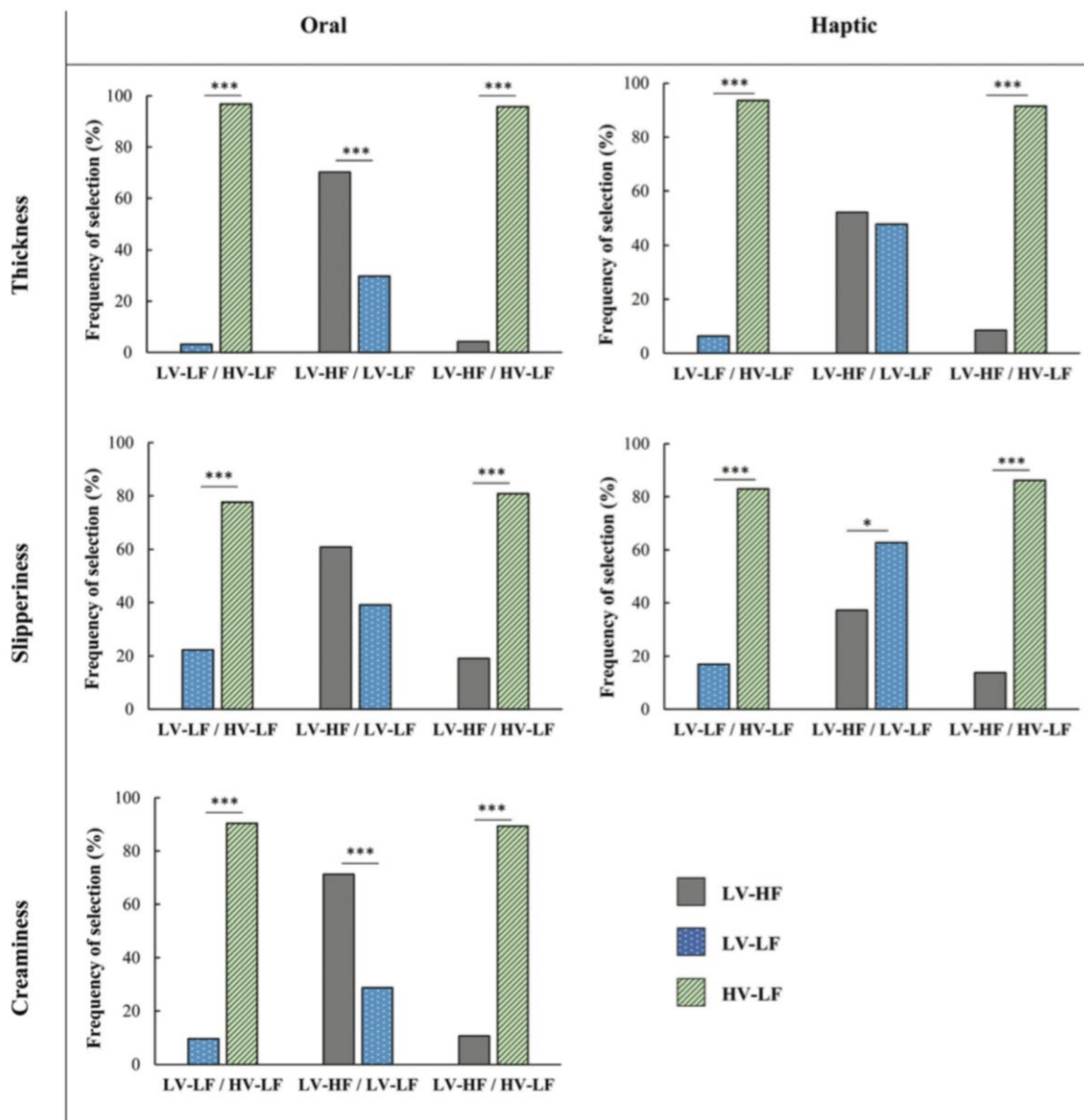


Figura 26 Contributo relativo della viscosità e frizione materiale sulla percezione sensoriale delle proprietà della texture (cremosità, viscosità e scivolamento) nell'esperienza orale e aptica (metodo della doppia scelta forzata, 2-AFC)

Tabella _

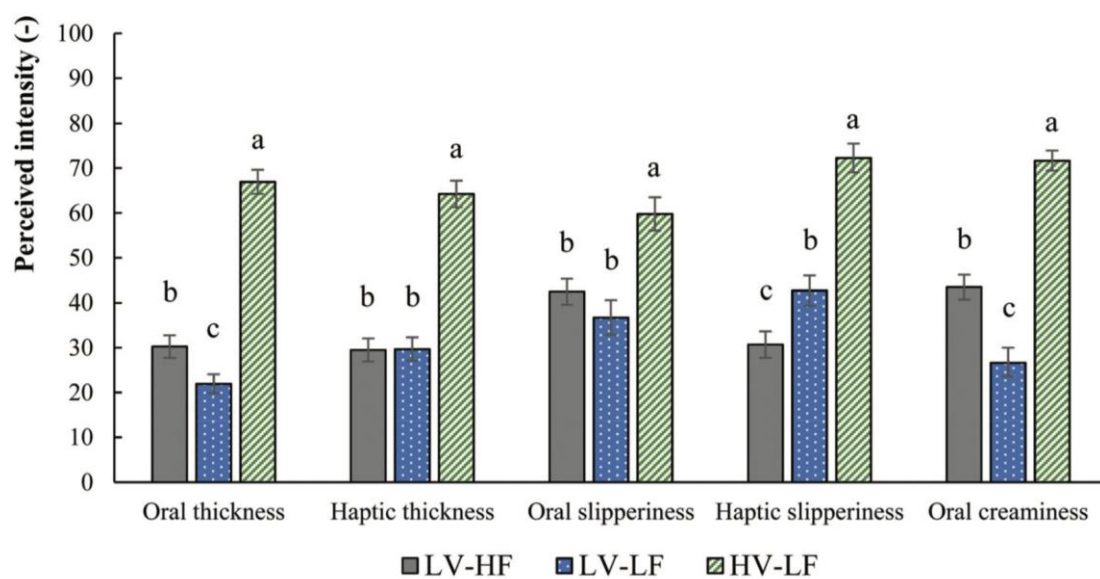


Figura 27 Analisi di ordinamento dell'intensità percepita sensorialmente degli attributi della texture (cremosità, viscosità e scivolamento) nell'esperienza aptiche e orale

CASO STUDIO #3 ALIMENTI PER PAZIENTI DISFAGICI

La coesività è riconosciuta come una proprietà della texture degli alimenti destinati a soggetti con difficoltà masticatorie e di deglutizione (disfagia). Sebbene il termine “coesività” sia utilizzato comunemente per la descrizione di questi prodotti, la valutazione sensoriale e strumentale resta ancora una sfida da affrontare e risolvere. Attualmente non esiste un metodo strumentale per determinare la coesività dei materiali semi-solidi e semi-liquidi, come gli alimenti addensati destinati a soggetti con disfagia. La tecnica TPA dell’analisi del profilo della texture ottenuto strumentalmente è comunemente utilizzata nell’industria alimentare per misurare la coesività dei materiali. Tuttavia, diversi studi hanno evidenziato che tale approccio non è adatto per materiali semi-solidi e semi-liquidi (Houjajj, 2009) (Nishinari, 2019) e i risultati non sono scientificamente attendibili (Peleg, 2019). Oltre ai metodi reologici, non vi alcun altro metodo strumentale standardizzato (di più semplice applicazione) che possa essere ritenuto valido su scala industriale e clinica per valutare la coesività materiale degli alimenti destinati a soggetti disfagici. Un recente studio è stato focalizzato sulla correlazione delle proprietà reologiche di acqua addensata (destinata a soggetti disfagici) alla coesività percepita sensorialmente attraverso l’esperienza visiva (Hadde & Chen, 2015). L’analisi sensoriale della coesività è stata eseguita da 32 assaggiatori e i campioni di acqua addensata sono stati preparati utilizzando diversi composti commerciali con effetto addensante. Sono state determinate alcune proprietà reologiche (viscosità dinamica, yield stress, modulo elastico dinamico, viscosità estensionale) e messe in relazione alla coesività percepita visivamente. I risultati evidenziano che la massima viscosità estensionale è la proprietà materiale che meglio si correla alla coesività percepita visivamente e potrebbe essere proposta come indicatore della coesività sensoriale del prodotto esaminato. Gli autori hanno sviluppato un metodo manuale di scorrimento forzato del fluido attraverso una siringa da impiegare nelle sessioni di analisi visiva della coesività. L’estrusione dei fluidi dalla siringa era eseguito in accordo alle linee guida internazionali pubblicate dal IDDS (2015), iniziativa internazionale per la dieta desinata ai soggetti disfagici. L’attributo della coesività è stato definito in modo inequivocabile come **“grado di estensione del fluido durante lo scorrimento libero prima dell’interruzione di continuità”**.

I risultati di correlazione delle misure sensoriali derivanti da questo metodo manuale sono stati proposti per la sua standardizzazione nella valutazione sensoriale della coesività dei fluidi alimentari destinati a soggetti con disfagia.

Low
cohesiveness



High
cohesiveness



Figura 28 Tipico comportamento estensionale di un fluido viscoelastico. Bassa viscosità estensionale consente allungamenti più lenti e più estesi prima dell'interruzione di continuità (formazione di gocce, indipendenti, gocciolamento). Alta viscosità estensionale consente un allungamento meno esteso e la formazione più rapida di gocce indipendenti.

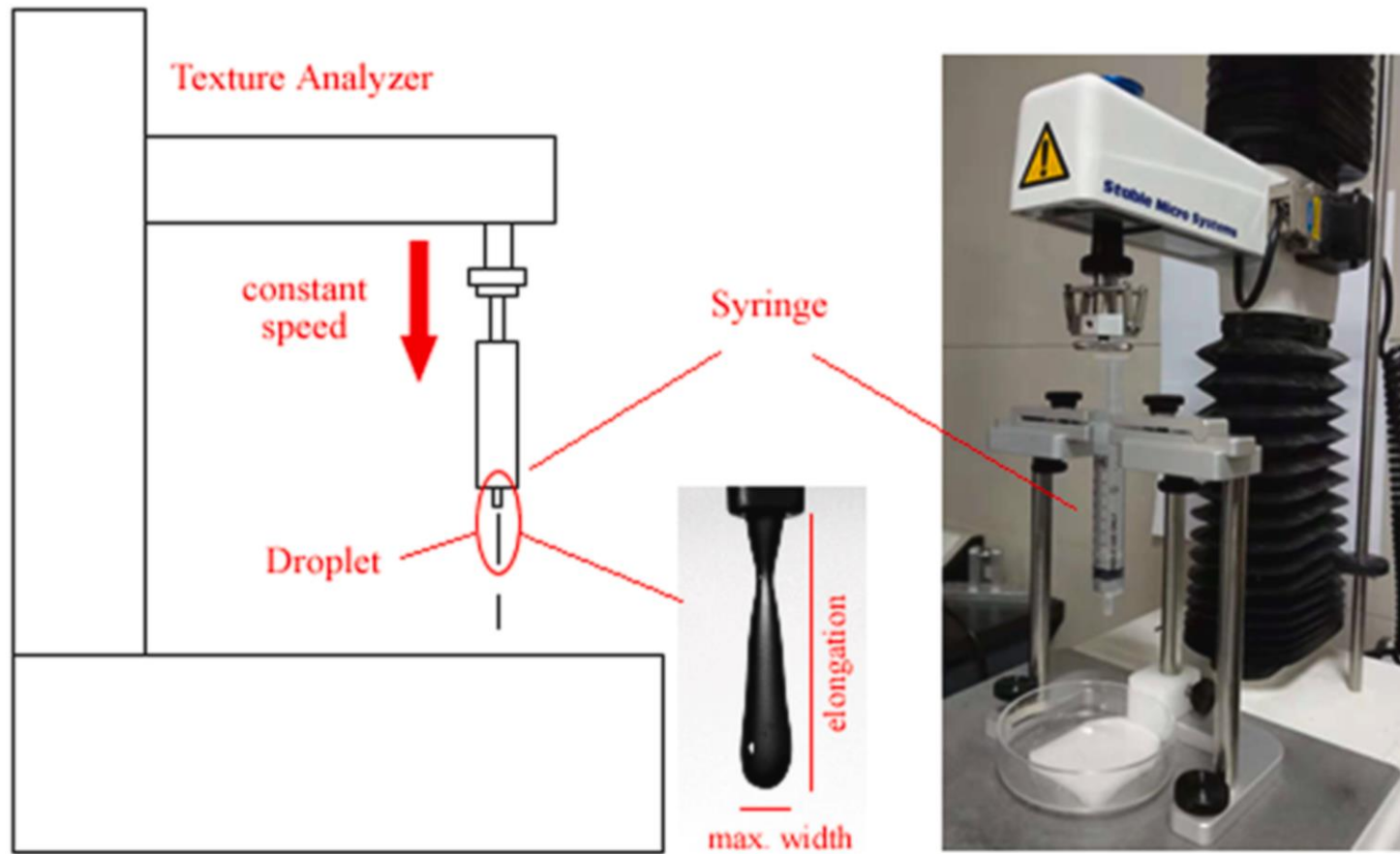


Figura 29 Analizzatore meccanico accoppiato all'estrusione del fluido dalla siringa. Il sistema consente di standardizzare la pressione e la velocità esercitata e la misura dei tempi di sgocciolamento

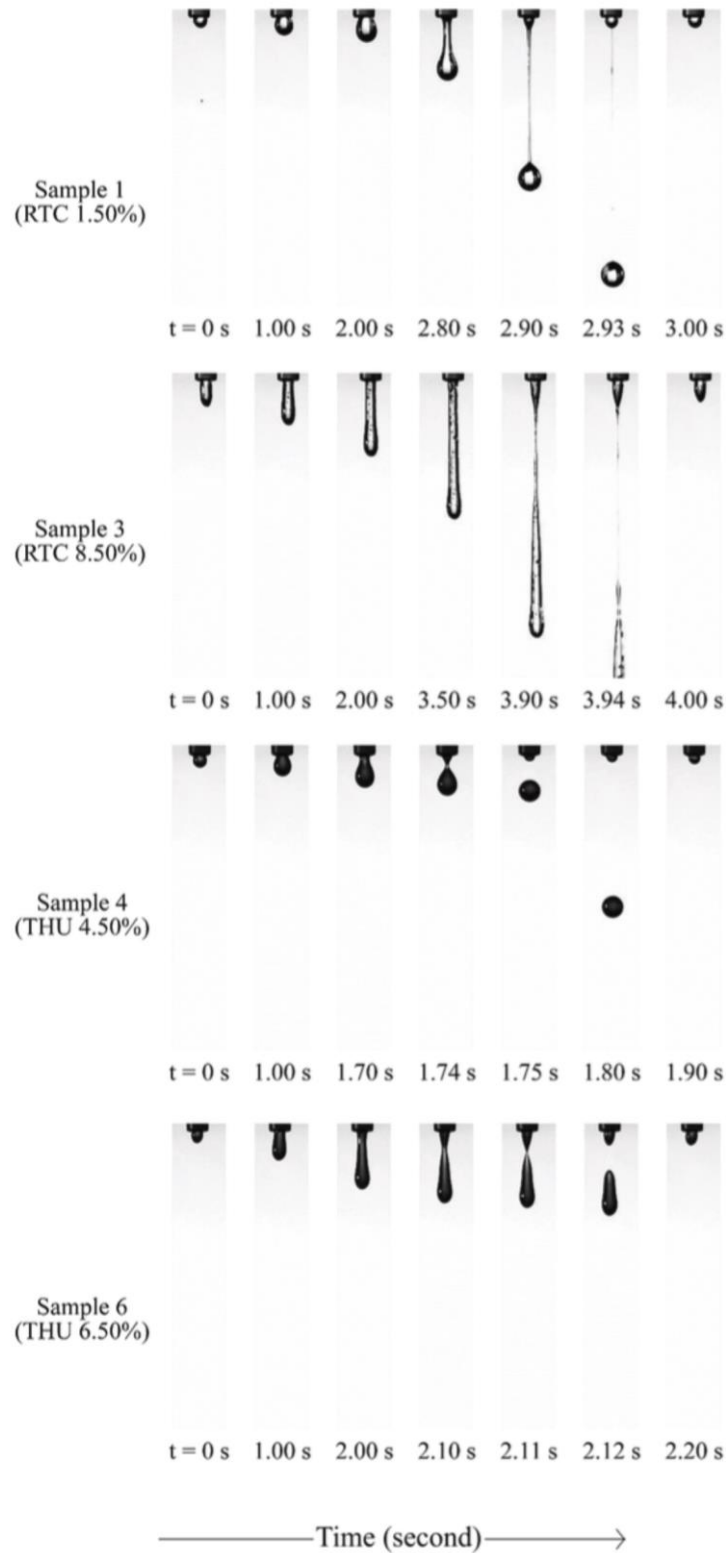


Figura 30 Comportamento durante il flusso dei vari campioni

Sample No.	Thickener	Thickener concentration %	Shear viscosity at 50 s ⁻¹ (Pa.s) *	Apparent Yield Stress (Pa)*	Elastic modulus at 50 rad/s (Pa) *	Surface tension (mN/m)	Max. extensional viscosity (Pa.s)*	Filament Break-up time (ms)*	Droplet aspect ratio*
1	RTC	1.50	0.134 ± 0.023 ^g	1.75 ± 0.22 ^e	10.10 ± 1.79 ^d	60.76 ± 0.93	5.11 ± 0.39 ^c	410 ± 23 ^d	9.46 ± 1.28 ^{c,d}
2	RTC	3.00	0.254 ± 0.005 ^f g	3.58 ± 0.31 ^{d,e}	20.66 ± 3.65 ^{c,d}	55.92 ± 2.44	8.41 ± 0.95 ^b	704 ± 87 ^c	11.5 ± 2.23 ^c
3	RTC	8.50	0.874 ± 0.013 ^a , b	10.4 ± 0.32 ^{b,c}	69.02 ± 6.07 ^{b,c} , d	41.04 ± 4.10	32.4 ± 4.49 ^a	1568 ± 162 ^a	22.4 ± 3.13 ^a
4	THU	4.50	0.275 ± 0.024 ^f g	0.74 ± 0.10 ^e	211.8 ± 53.5 ^a	48.22 ± 1.69	Too low	49 ± 5 ^f	2.05 ± 0.12 ^e
5	THU	5.00	0.313 ± 0.017 ^e , f	3.33 ± 0.21 ^{d,e}	234.3 ± 73.0 ^a	52.06 ± 3.36	0.12 ± 0.01 ^e	52 ± 4 ^f	2.54 ± 0.23 ^e
6	THU	6.50	0.744 ± 0.050 ^b , c	11.0 ± 4.31 ^{b,c}	237.2 ± 72.8 ^a	Not measured (52.06 is used)	0.42 ± 0.12 ^e	65 ± 9 ^f	4.93 ± 0.33 ^{d,e}
7	HHC	6.00	0.529 ± 0.028 ^d	13.2 ± 0.96 ^b	57.51 ± 4.76 ^{c,d}	49.06 ± 3.06	3.00 ± 0.46 ^d	306 ± 43 ^e	11.4 ± 0.50 ^c
8	HHC	11.00	1.005 ± 0.097 ^a	22.8 ± 1.88 ^a	148.4 ± 6.82 ^{b,c}	48.34 ± 2.25	24.1 ± 2.31 ^a	724 ± 103 ^{b,c}	21.1 ± 2.16 ^a
9	RTC	6.50	0.593 ± 0.009 ^c , d	6.73 ± 0.19 ^{c,d}	46.55 ± 6.26 ^{c,d}	47.00 ± 2.75	24.8 ± 7.15 ^a	1085 ± 98 ^b	16.4 ± 3.13 ^b
10	THU	5.50	0.447 ± 0.042 ^d , e	3.88 ± 1.27 ^{d,e}	180.8 ± 54.8 ^{a,b}	Not measured (52.06 is used)	0.24 ± 0.01 ^e	54 ± 3 ^f	2.76 ± 0.06 ^e

Note: *mean values in the same column that do not share letter are statistically different (p < 0.05).

Tabella 18 Riepilogo dei parametri reologici e delle proporzioni dei campioni delle gocce

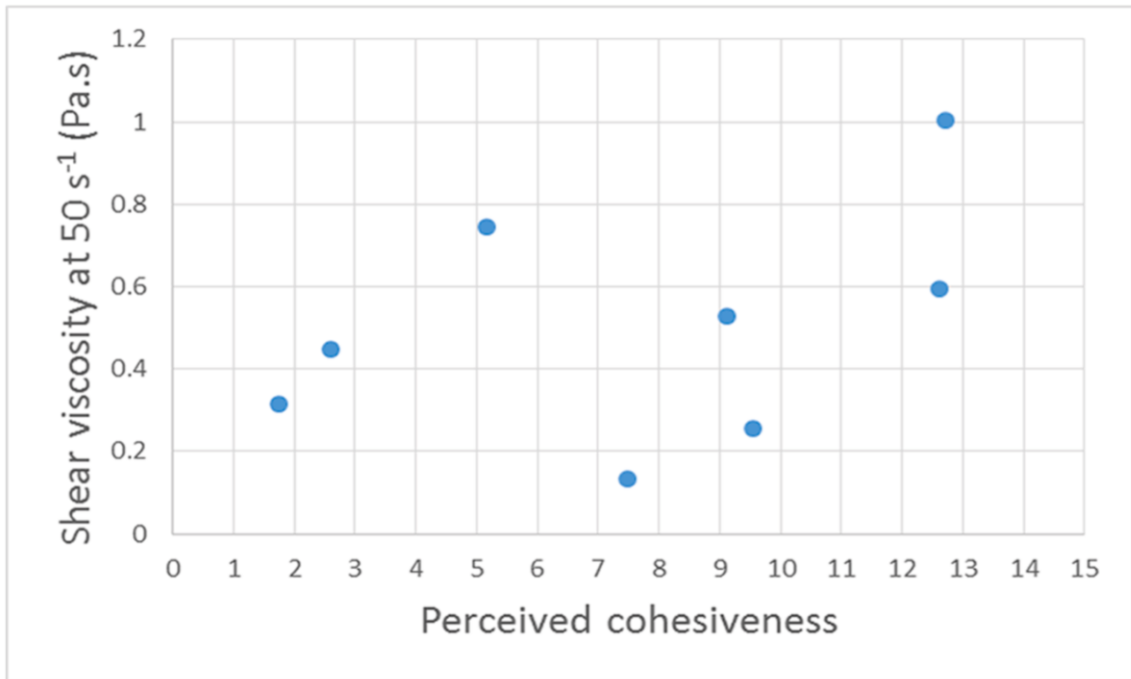


Figura 31 Correlazione tra la velocità di scorrimento Misurata alla velocità 50 s⁻¹ e la percezione della coesività

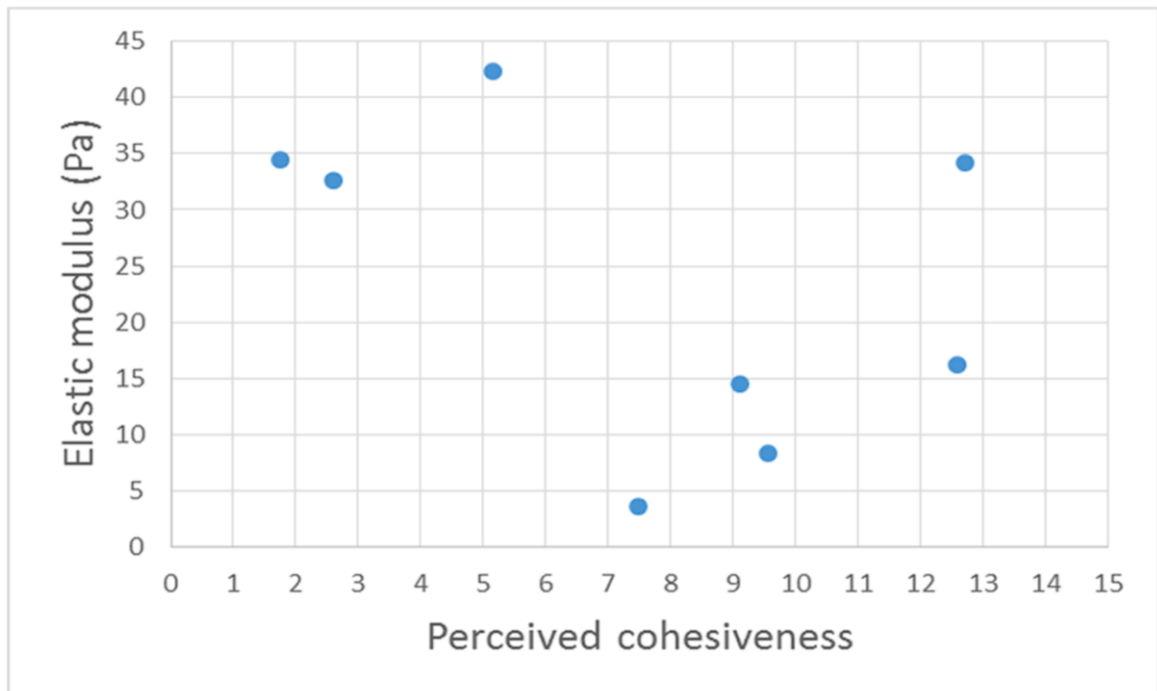


Figura 32 Correlazione tra il modulo elastico a 50 rad/s e la coesività percepita

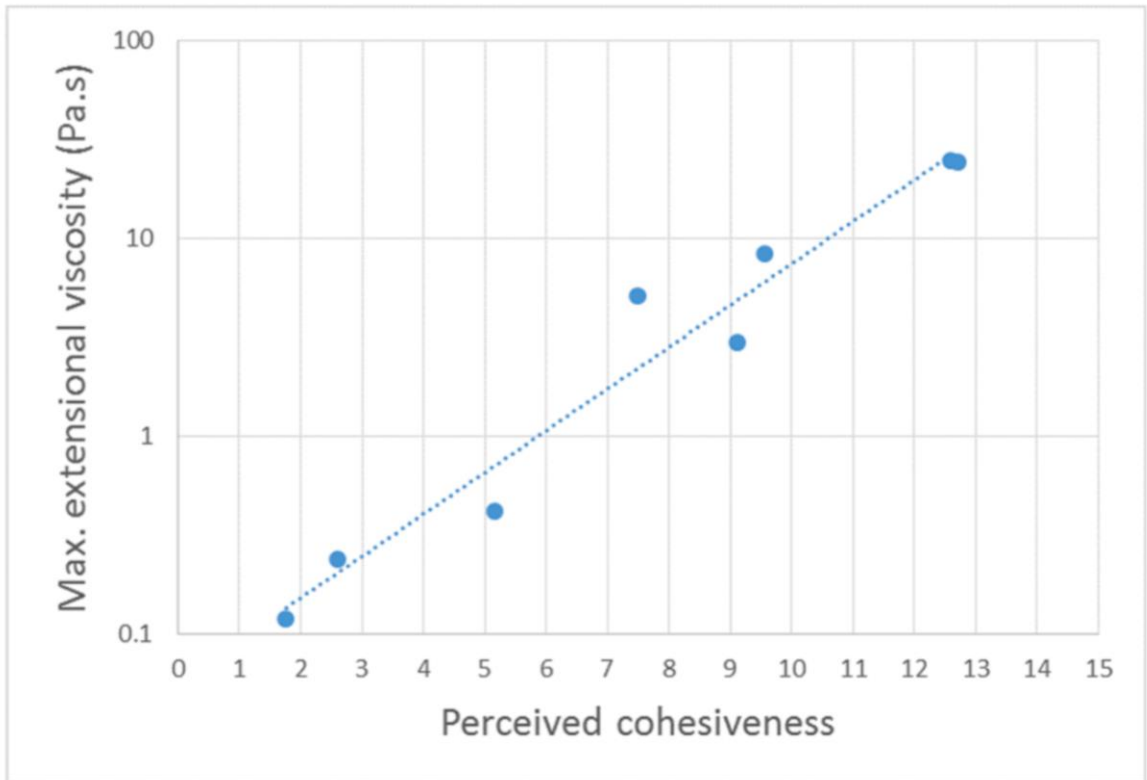


Figura 33 Correlazione tra viscosità Misurata alla massima estensione e la coesività percepita.

(b)

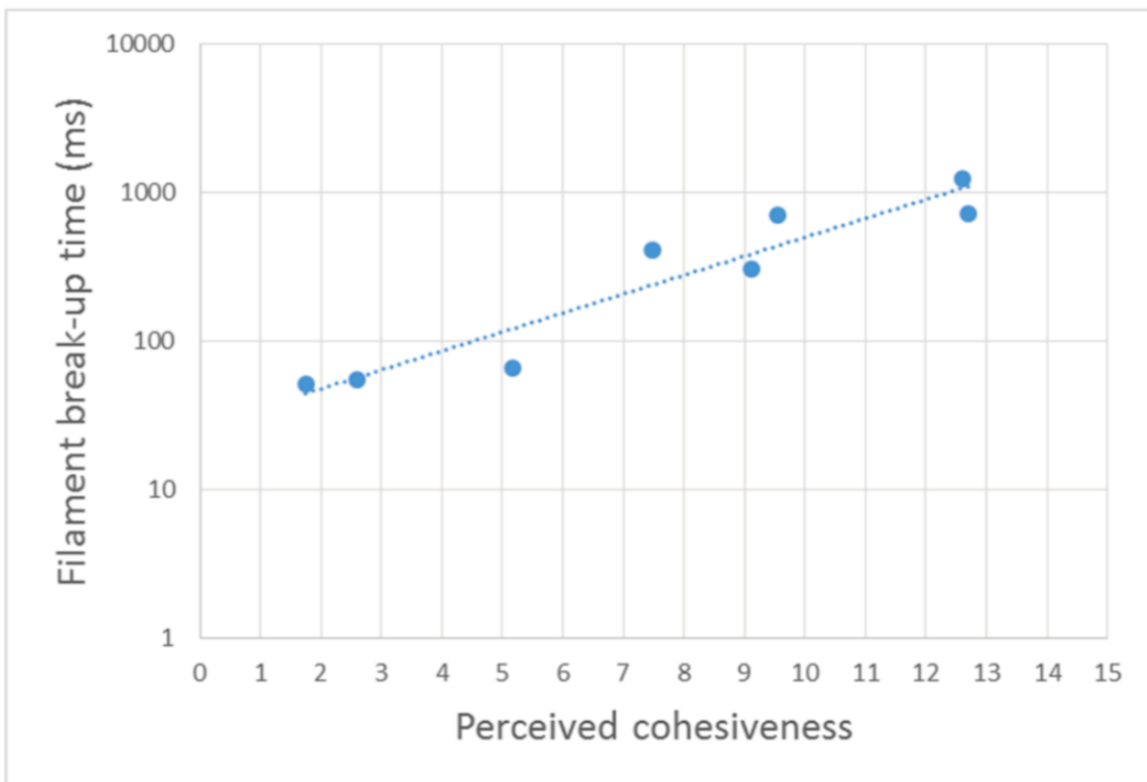


Figura 34 Correlazione tra tempo di rottura del filamento e la percezione della coesività

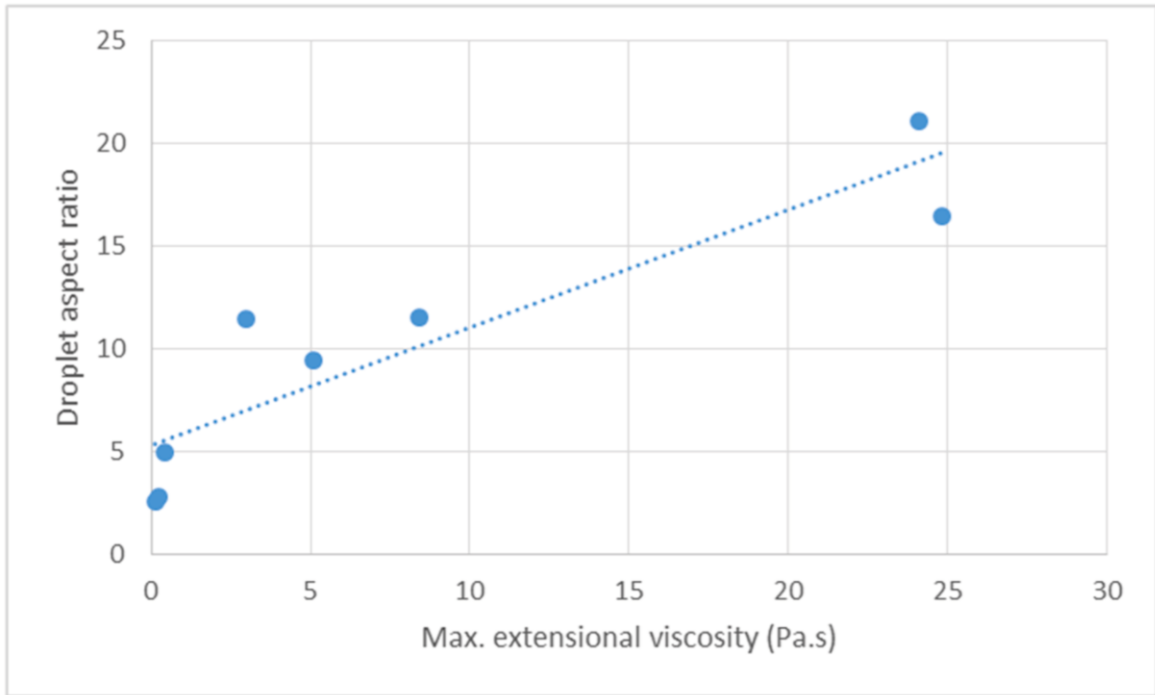


Figura 35 Correlazione tra l'aspetto delle gocce e la massima estensione della viscosità percepita

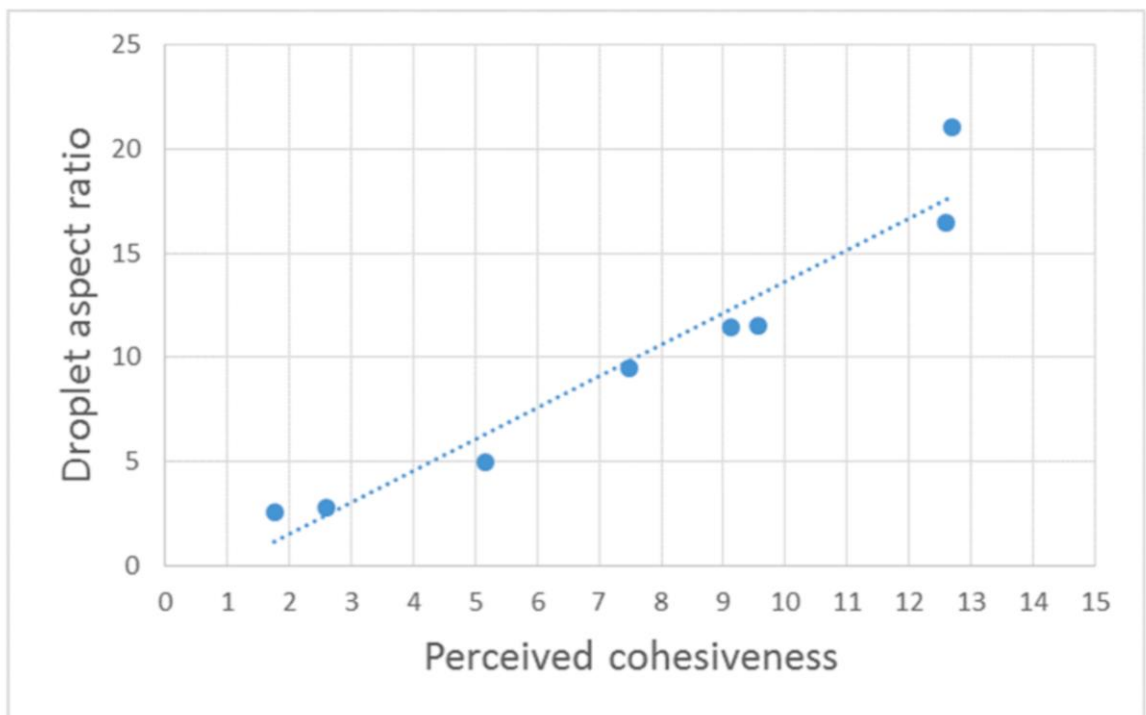


Figura 36 Correlazione tra l'aspetto delle gocce e la percezione della coesività

ACETO BALSAMICO TRADIZIONALE

La valutazione sensoriale della qualità degli aceti balsamici tradizionali di cui L'Unione Europea ha riservato la protezione della denominazione di origine (DOP) è un presupposto per il riconoscimento dell'autenticità e per l'immissione sul mercato di questi preziosi aceti. La viscosità materiale è principalmente legata al contenuto di sostanze ad elevato peso molecolare (note sotto il nome di melanoidine). Tali sostanze sono prodotte dalle reazioni chimiche di degradazione degli zuccheri (glucosio e fruttosio) che sono attivate nel processo di cottura del mosto d'uva (materia prima nella produzione dell'aceto) e procedono spontaneamente durante tutto il lungo periodo di maturazione biologica, chimico-fisica e reologica del prodotto (che per legge deve essere di almeno 12 anni). Pertanto, la viscosità materiale può essere considerato un buon indicatore della qualità e del grado di invecchiamento del prodotto. La percezione sensoriale della texture dell'aceto balsamico prevede la valutazione visiva del comportamento reologico in specifiche condizioni di scorrimento. I giudici assaggiatori valutano il tempo e il grado di assottigliamento del film liquido durante lo scorrimento sulle pareti di una bottiglia di vetro. Di seguito si riportano i risultati della correlazione tra la viscosità materiale misurata strumentalmente in condizioni controllate di gradiente di scorrimento (1000s^{-1}) e la viscosità percepita durante l'esperienza visiva del suo scorrimento. I risultati evidenziano una relazione di tipo logaritmico tra l'intensità percepita visivamente e la viscosità materiale. In accordo alle leggi della psicoreologia, la perdita di linearità delle due grandezze dipende da meccanismi di adattamento fisiologico all'aumentare dell'intensità dello stimolo fisico rilevato durante l'esperienza sensoriale. Pertanto, per una più attendibile valutazione sensoriale della viscosità, sarebbe opportuno determinare la soglia minima differenziale tra i livelli di intensità dello stimolo reologico allo scopo di progettare e impiegare adeguate scale strutturate per l'analisi sensoriale della viscosità. In questo modo sarà possibile considerare attendibili solo le risposte sensoriali riferibili alle comparazioni tra campioni con una differenza minima di viscosità materiale. Un altro risultato interessante riguarda il possibile effetto di componenti psicologiche probabilmente non legate all'esperienza sensoriale pregressa degli assaggiatori. Si è osservato infatti un effetto tipicamente noto come "size-weight illusion" sul giudizio sensoriale: campioni con viscosità materiale superiori a circa $2\text{Pa}\cdot\text{s}$ erano percepiti con una minore intensità della viscosità durante l'esperienza visiva.

Questo comportamento è stato attribuito all'effetto casuale dell'incremento della componente elastica materiale di questi campioni sul flusso del liquido durante l'esperienza visiva della viscosità.

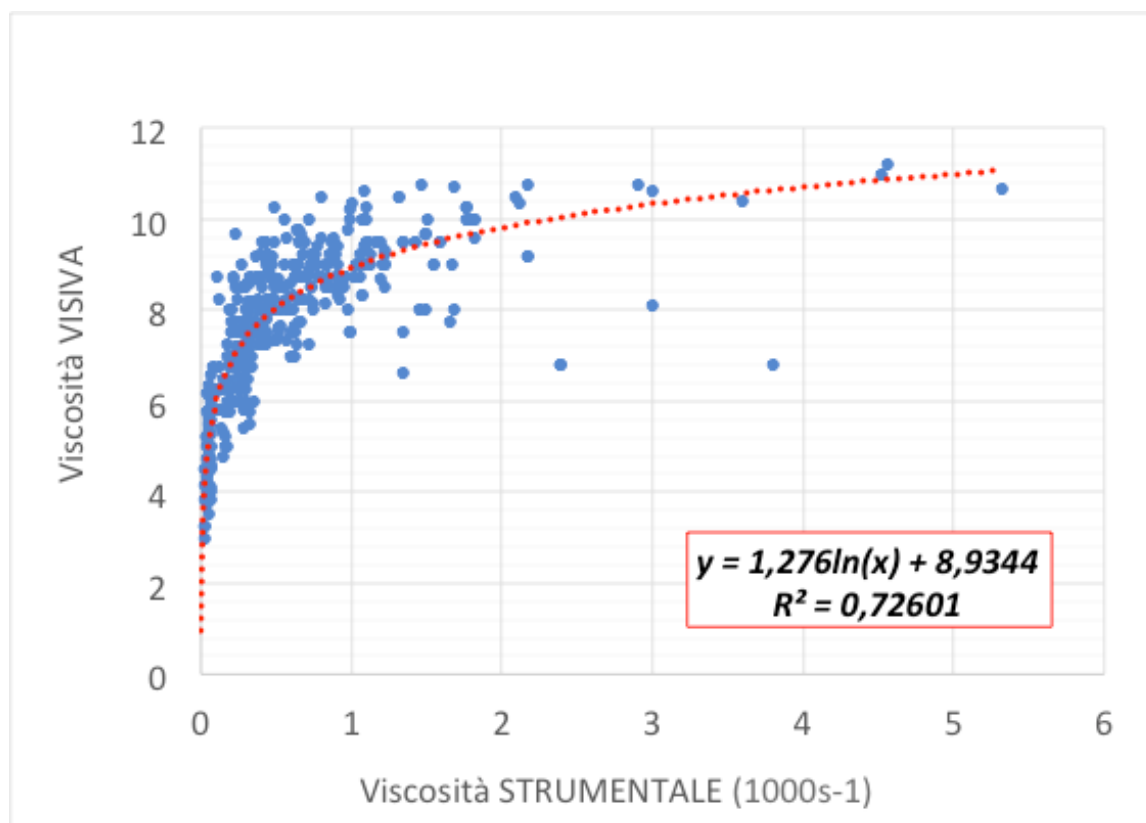


Figura 37 Relazione logaritmica tra viscosità percepita sensorialmente e viscosità dinamica misurata strumentalmente in condizioni stazionarie di gradiente di scorrimento (1000s-1). I dati si riferiscono a 436 campioni di aceto, ciascuno fornito da un'azienda diversa.

CONCLUSIONI

La texture degli alimenti gioca un ruolo determinante nell'accettabilità commerciale, nella preferenza e nel comportamento del consumatore al momento dell'acquisto e del consumo. L'analisi sensoriale della texture degli alimenti è di grande interesse nella prospettiva della progettazione e caratterizzazione della qualità degli alimenti ma anche nella prospettiva della segmentazione di mercato. Il consumatore crea aspettative sulla qualità degli alimenti attraverso la valutazione sensoriale (visiva, aptica, uditiva e gustativa) della texture (proprietà materiali o "intrinsic attributes/cues") e delle proprietà materiali dell'imballaggio (extrinsic properties(cues) così come attraverso l'acquisizione di informazioni non materiali (tradizione, identità, occasione, contesto di consumo). La percezione sensoriale della texture non dipende solo dalle proprietà materiali dell'alimento, ma anche da fattori individuali psicologici, fisiologici, di salute, legati all'esperienza pregressa nel consumo dell'alimento ma anche da fattori non strettamente legati all'esperienza, indotti dal contesto e percepiti in modo istintivo e compulsivo dal soggetto che ne subisce effetti illusori.

La valutazione sensoriale non è una semplice integrazione delle informazioni acquisite attraverso le diverse modalità sensoriali ponderate in funzione della dominanza dei segnali fisici acquisiti. La valutazione sensoriale è anche il risultato della stretta interdipendenza degli stimoli fisici acquisiti nelle diverse delle modalità sensoriali (visiva, aptica e orale) anche in funzione dell'ordine cronologico delle esperienze sensoriali. La differenza di percezione nelle diverse modalità sensoriali dipende dai diversi meccanismi coinvolti nella sensazione degli stimoli generati dalle proprietà materiali. La modalità di associazione del significato/valore agli stimoli acquisiti è del tutto soggettiva. Una delle principali conseguenze della soggettività della percezione della texture, è una terminologia impiegata a livello internazionale non ancora unificata e condivisa. La difficoltà di una visione univoca e coerente della texture degli alimenti è legata essenzialmente alla soggettività della valutazione sensoriale delle proprietà di struttura e alla scarsità di metodologie in grado di simulare le condizioni di esperienza soggettiva.

La determinazione strumentale delle proprietà reologiche è di indubbia utilità nel comprendere in parte la percezione sensoriale nelle diverse modalità esperienziali (visiva,

aptica, e orale). Tuttavia, se da un lato sono disponibili numerose tecniche strumentali per la determinazione delle proprietà reologiche degli alimenti, dall'altro sono veramente pochi i metodi per la valutazione sensoriale delle caratteristiche della texture correlate alle proprietà materiali. D'altra parte, tali correlazioni sono indispensabili ai fini della progettazione/ottimizzazione dei processi produttivi degli alimenti così come per una più adeguata segmentazione di mercato. Ci sono numerosi studi nel campo delle associazioni tra la modalità orale di analisi sensoriale e le altre, e recentemente un crescente interesse si sta registrando nell'associazione della modalità aptica alle altre. L'interdipendenza delle modalità sensoriali è stata recentemente dimostrata attraverso l'impiego della tecnologia aptica e immersiva basata sulla realtà virtuale. Tale approccio emergente permette di manovrare in modo indipendente le sensazioni visive, uditive e tattili durante l'esperienza sensoriale.

La maggiore disponibilità di tecniche strumentali per la determinazione delle proprietà reologiche insieme alla emergente disponibilità di tecnologie innovative che permettono di creare nuove strutture/texture su misura (tailor-made texture) come la stampa 3D e alle immersive basate sulla realtà virtuale, offrono numerosi spunti di ricerca e innovazione per i progettisti, gli sviluppatori, i professionisti dell'analisi sensoriale e del marketing che possono risultare non solo in un arricchimento della esperienza sensoriale e della soddisfazione (piacere e benessere al consumo) del consumatore ma anche in un incremento della sicurezza al consumo per soggetti disfagici e in un aumento della competitività delle imprese alimentari. L'incorporazione di appropriati elementi tattili nell'esperienza sensoriale di un alimento o bevanda può indurre influenza positiva sulla percezione di altri stimoli percepiti con modalità sensoriali differenti, sul gradimento, emozioni e comportamenti all'acquisto da parte del consumatore. Gli elementi tattili possono essere direttamente introdotti nella struttura materiale dell'alimento attraverso formulazioni innovative degli ingredienti e l'impiego di nuovi processi tecnologici in grado di creare nuove texture, ad esempio quando l'alimento è destinato a soggetti con particolari esigenze funzionali e/o aspettative sulla qualità. Un'ampia gamma di possibilità alternative all'intervento di progettazione materiale è rappresentata dalla progettazione di diverse modalità di condizionamento della percezione della texture, che includono nuove modalità di presentazione dell'alimento, la scelta mirata delle dimensioni e la superficie del prodotto, il materiale di confezionamento e l'ambiente di esposizione.

BIBLIOGRAFIA

- Adams s., F. W. S. J., 2004. Influence of particle modulus on the rheological properties of agar microgel suspension.. *Journal of Rheology* .
- Adams, S. S. S. J. R. & W. T., 2007. In-vivo visualisation of mouthmaterial interactions by video rate endoscopy. *Food Hydrocolloids*.
- Agrawal, 1999. The effects of food texture on chewing patterns in human subjects. PhD thesis. *University of Hong Kong*..
- Agrawal & Lucas, 2003. The mechanics of the first bite.
- Akhtar, Stenzel, S.Murray, B. & Dickinson, E., 2005. Factors affecting the perception of creaminess of oil-in-water emulsions.
- Annelies E. Blok, D. P. B. a. M. S., 2020. Contributions of viscosity and friction properties to oral and haptic texture perception of iced coffees.
- Antmann, 2010. Consumers' texture vocabulary: Results from a free listing study in three Spanish-speaking countries.
- Arboleda, 2017. The French, German, and Spanish sound of eating fresh fruits and vegetables.
- Ares, G. J. S. A. L. e. a., 2015. Comparison of TCATA and TDS for dynamic sensory characterization of food products.
- Ares, Jaeger & S.R., A. L. e. a., 2015. Comparison of TCATA and TDS for dynamic sensory characterization of food products.. *Food Research International*.
- Bianchi, G., Verdi, G. & Rossi, M., 2018. Titolo dell'articolo. *Journal Name*, 48(3), pp. 11-15.
- Bongaerts, J. H. H. F. K. & S. J. R. (., 2007. SoftTribology: lubrication in a compliant PDMS-PDMS contact.. *Tribology International*.
- Bosman, F. v. d. B. A. A. J. H. & v. d. G. H. W., 2004. Neuromuscular control mechanisms in human mastication.. *Journal of Texture Studies*..
- Bourne, M., 2002. Food Texture and Viscosity, Concept and Measurement.
- Brandt, 1963. Texture Profile Method.
- Brandt, S. L. C. J., 1963. Texture profile method. *Journal of Food Science*.

- Bruno, 2016. Elementi di psicofisica terza versione.. *Dispensa per il corso “Percezione e Psicofisica”, Corso di Laurea Specialistica in “Psicobiologia e Neuroscienze Cognitive”, Università di Parma.*
- Castura, J. A. L. G. A. e. a., 2016. Temporal check-all-that-apply (TCATA): a novel dynamic method for characterizing products.. *Food Quality and Preference.*
- Chen, 2014. Food oral processing: Mechanisms and implications of food oral destruction.. *Trends in Food Science & Technology.*
- Chena, J., MinFenga, Gonzaleza, Y. & A.Pugnalonib, L., 2008. Application of probe tensile method for quantitative characterisation of the stickiness of fluid foods.
- Chen, J., 2007. Food oral processing—A review. *Food Hydrocolloids.*
- Chen, J., 2009. Food oral processing – a review. *Food Hydrocolloids.*
- Chen, Karlsson & Poverly, 2005. Acoustic Envelope detector for Crispness Assessment of Biscuits.
- Chen & L., L., 2011. The determining role of bolus rheology in triggering a swallowing.. *Food Hydrocolloids.*
- Chen & Lolivret, 2011. The determining role of bolus rheology in triggering a swallowing. *Food Hydrocolloids.*
- Cheong, J. F. K. M. M. e. a., 2014. The application of temporal dominance of sensations (TDS) for oral processing studies: an initial investigation.. *Journal of Texture Studies .*
- Cichero, et al., 2013. The Need for International Terminology and Definitions for Texture-Modified Foods and Thickened Liquids Used in Dysphagia Management. *Foundations of a Global Initiative.Curr Phys Med Rehabil Rep .*
- Civille & Szczesniak, 1973. Guidelines to Training a Texture Profile Panel.
- Cliff, M. & Heymann, H., 1993. Development and use of time-intensity methodology for sensory evaluation: a review.. *Food Research International.*
- Cutler, Morris & Taylor, 1983. Oral Perception of Viscosity in Fluid Foods and Model Systems.
- de Wijk, J. & Prinz, 2011. Oral movements and the perception of semi-solid foods.
- Devezeaux de, L., Velde, V. d. & M., S., 2016. Bolus matters: the influence of food oral breakdown on dynamic texture perception.. *Food & Function.,*
- Dickie A.M., e. K. J., 1982. Use of the Bird-Leider equation in food rheology.. *Journal of Food Process Engineering.*
- Drake, 1989. Sensory Textural/Rheological Properties—A Polyglot List. *journal of texture studies.*

- E.R., D. I. E. A. K. M., 1989. Relationship of electromyographic evaluation of semi-fluid model system with dynamic shear viscosity. *Gums and Stabilisers for the Food Industry. Vol 4.*
- Elizabeth J. Saccone, O. L. & P. A. C., 2019. A meta-analysis of the size-weight and material-weight illusions.
- Engelen, L., Fontijn-Tekamp, A. & Bilt, A. v. d., 2005. The influence of product and oral characteristics on swallowing.
- F.Hayakawa, 2013. Vocabularies and terminologies of food texture description and characterisation.
- Ferguson, 1999. Oral bioscience. Edinburgh. *Churchill Livingstone.*
- Fizman & Tarrega, A., 2018. The dynamics of texture perception of hard solid food:a review of the contribution of the temporal dominance of sensations technique.. *Journal of Texture Studies .*
- Foegeding E.A., V. C. E. G. G. S. C. C., 2015. Transforming structural breakdown into sensory perception of texture.. *Journal of Texture Studies.*
- Foegeding, e. a., 2014. Adaptation of Oral Processing to the Fracture Properties of Soft Solids.
- Foster, A.Woda & M., A., 2006. Effect of Texture of Plastic and Elastic Model Foods on the Parameters of Mastication. *Neurophysiol.*
- Foster, et al., 2010. The role of oral processing in dynamic sensory perception. *Journal of Food Science.*
- Friedman, W. S. A., 1963. The Texturometer—a new instrument for objective texture measurement. *Journal of Food Science .*
- G.M.Bornhorst & Singh, R., 2011. Bolus formation and disintegration during digestion of food carbohydrates.. *Comprehensive Reviews in FoodScience and Food Safety.*
- Hadde & Chen, 2015. Shear and extensional rheological characterization of thickened fluid for dysphagia management.
- Haggard & Boer, D., 2014. Oral Somatosensory Awareness.
- Hayakawa, F., 2015. Vocabularies and terminologies of food texture description and characterization.
- Hoebler, et al., 2000. Particle size of solid food after human mastication and in vitro simulation of oral breakdown.. *International Journal of Food Sciences and Nutrition, 51, 353–366.*
- Hoebler, et al., 1998. Physical and chemical transformations of cereal food during oral digestion in human subjects. *British Journal of Nutrition, 80, 429–436.*

- Houjaij, D. L. & R., 2009. Textural Characterization of poored cake prepared for the therapeutic treatment of dysphagic patients.
- Hutchings, J. & Lillford, P., 1988. The perception of food texture—the philosophy of the breakdown path. *Journal of Texture Studies*.
- Jack, Piggott J.R. & Paterson, A., 1994. Analysis of textural changes in hard cheese during mastication by progressive profiling. *Journal of Food Science*.
- Jeltemaa, M., B. J. & Vahalik, J., 2015. Model for understanding consumer textural food choice. *Food Science & Nutrition* 3.
- K.R.Agrawa, P.W.Lucas, J.F.Prinz & C.Bruce, 1997. Mechanical properties of foods responsible for resisting food breakdown in the human mouth.
- Kaatzke-McDonald MN, P. E. D. P., 1996. The effects of cold, touch, and chemical stimulation of the anterior faucial pillar on human swallowing. *Dysphagia*.
- Karen M. Hiiemae, P. B. P. M., 1999. Food Transport and Bolus Formation during Complete Feeding. *Dysphagia*.
- Katsunori, 2013. Effects of Visual Food Texture on Taste Perception.
- Kilcast & Roberts, 2007. Perception and Measurement of Stickiness in Sugar-Rich Foods.
- Kim E-J., C. V. W. A. W. I. H. I. M. M., 2011. Fundamental Fracture properties associated with sensory hardness of brittle solid foods.. *Journal of Texture Studies* .
- Koç, H., Vinyard, C., Essick, G. & al, e., 2013. Food oral processing: conversion of food structure to textural perception. *Annual Review of Food Science and Technology*.
- Kohyama, Hatakeyama, Dan & Sasak, 2005. Effects of Sample Thickness on Bite Force for Raw Carrots and Fish Gels. *Journal of Texture Studies*.
- Kohyama, K., 2015. Oral sensing of food properties.. *Journal of Texture Studies*.
- Kohyama, Mioche & Bourdiol, 2003. Influence of age and dental status on chewing behaviour studied by EMG recordings during consumption of various food samples. *Gerodontology*.
- Kohyama, Mioche & Martin, 2007. Chewing Patterns of Various Texture foods Studied by Electromiography in young and Elderly Populations.
- Kokini, J. L. K. J. & C. E. L., 1997. Liquid texture perceived in the mouth. *Journal of Texture Studies*.
- Koliandris, A.-L. et al., 2010. Correlation between saltiness perception and shear flow behaviour for viscous solutions.

- Labbe, S. P. N. e. a., 2009. Temporal dominance of sensations and sensory profiling: a comparative study.. *Food Quality and Preference*.
- Lavergne, D. d., Velde, V. d. & Stieger, 2016. Bolus matters: the influence of food oral breakdown on dynamic texture perception. *Food & Function*,.
- Lazo O., C. A. G. L., 2016. A comparison of two methods for generating descriptive attributes with trained assessors: check-all-that-apply (CATA) vs. free choice profiling (FCP). *Journal of Sensory Studies*.
- Le Révérend, H. F. A. e. a., 2008. Comparison between temporal dominance of sensations and time intensity results. *Food Quality and Preference*.
- Lee, W. I. & Pangborn, R., 1986. Time-intensity: the temporal aspects of sensory perception. *Food Technology*.
- Levine, et al., 1987. Structural aspects of salivary glycoproteins. *Journal of Dental Researches*.
- Lillford, P., 2018. Texture and breakdown in the mouth: an industrial research approach. *Journal of Texture Studies*.
- Logemann, J. A. P. B. R. C. L. L. C. F. M. a. K. P. J., 1995. Effects of a sour bolus on oropharyngeal swallowing measures in patients with neurogenic dysphagia.
- Lucas P.W., P. J. A. K. B. I., 2002. Food physics and oral physiology. *Food Quality and Preference* 13 (.
- Malone, M. E. A. I. A. M. & N. I. T., 2003. Oral behaviour of food hydrocolloids and emulsions. Part 1. Lubrication and deposition considerations. *Food Hydrocolloids*.
- Marie-Agne`s Peyron, O. B. P. L. W., 2004. Influence of Age on Adaptability of Human Mastication.
- Martin-Harris, B. et al., 2008. MBS Measurement Tool for Swallow Impairment—MBSImp.: *Dysphagia* .
- Meullenet, J. F. F. M. L. & G. M., 2002. Measurements of biting velocities and predetermined and individual crosshead speed instrumental imitative tests for predicting cheese hardness.. *Journal of Texture Studies*.
- Mioche, L., Peyron, & A., M., 1995. Bite force displayed during assessment of hardness in various texture contexts.. *Archives of Oral Biology*, 40, 415–423.
- Monaco, Cavella, S. & Masi, P., 2008. Predicting Sensory Cohesiveness, Hardness and Springiness of Solid Foods From Instrumental Measurements.
- Morris & Taylor, 1982. Oral perception of fluid viscosity.. *Progress in Food and Nutrition Science*,.

- Mosca & Chen, J., 2016. Food oral management: physiology and objective assessment. *Current Opinion in Food Science* 9.
- Nishinari, K. a. F. Y., 2018. Perception and measurement of food texture—solid foods. . *Journal of Texture Studies*.
- Nishinari, K. & Fang, Y., 2018. Perception and measurement of food texture—solid foods. *Journal of Texture Studies*.
- Nishinari, K. K. K. K. H. e. a., 2013. Parameters of texture profile analysis..
- Nishinari, K. T. M. N. M. & F. Y., 2019. Role of fluid cohesiveness in safe swallowing.
- Okada, M.Honma, S.Nomura & Y.Yamada, 2007. Oral behaviour from food intake until terminal swallow.. *Physiology & Behavior*.
- Olimpio, G. & Shama, i. d., 2018. *Polveriera Libano, guerra in attesa tra i militari italiani*. [Online] Available at: https://corriere.it/esteri/18_gennaio_29/polveriera-libano-guerra-attesa-c4c86560-0531-11e8-8913-7ceabd19f7b3.shtml
[Consultato il giorno 29 1 2021].
- P.W., L., J.F., P., K.R., A. & ., B. I., 2002. Food physics and oral physiology. *Food Quality and Preference* .
- Panouille´ M., S.-E. A. S. I., 2016. Instrumental methods for bolus characterization during oral processing to understand food perceptions.. *Current Opinion in Food Science*.
- Panouille´ , M., A., S.-E. & I., S., 2016. Instrumental methods for bolus characterization during oral processing to understand food perceptions.. *Current Opinion in Food Science* 9.
- Paphangkorakit, J. & O. J. W. (., 1997. The effect of pressure on a maximum incisal bite force in man. *Archives of oral Biology*, 42: 11-17.
- Peleg, M., 2019. The instrumental texture profile analysis revisited..
- Pineau N., S. P. C. S. e. a., s.d. Temporal dominance of sensations construction of the TDS curves and comparison with time-intensity.. *Food Quality and Preference*.
- Pouderoux P., K. P., 1995. Deglutitive tongue force modulation by volition, volume, and viscosity in humans. *Gastroenterology*. .
- Pramudya & Seo, 2019. Hand-Feel Touch Cues and Their Influences on Consumer Perception and Behavior with Respect to Food Products: A Review. *Foods*.
- Prinz, J. F., Wijk, d., A., R. & Huntjens, L., 2017. Load dependence of the coefficients of friction of oral mucosa.. *Food Hydrocolloids*, 21, 402–408..

- Richardson R.K., M. E. R.-M. S. T. L. e. D. I., 1989. Characterization of the perceived texture of thickened systems by dynamic viscosity measurements.. *Food Hydrocolloids*.
- Rolls, E., 2011. The neural representation of oral texture including fat texture. *Journal of Texture Studies*.
- Rosenthal, A. (., 1999. Relation between instrumental and sensory measures of food texture.. *Food Texture: Measurement and Perception*,.
- Rossetti D. Yakubov G.E. Stokes J.R., W. A. & G.G., F., 2008. Interaction of Human whole saliva and astringent dietary compounds investigated by interfacial shear rheology.. *Food Hydrocolloids*.
- Rossi, M., Bianchi, G. & Verdi, G., 2018. Titolo dell'articolo. *Journal Name*, pp. 10-15.
- Ryo Ishida, J. B. P. & K. M. H., 2002. Hyoid Motion During Swallowing: Factors Affecting Forward and Upward Displacement.
- Scott-Blair, G., 1958. Rheology in food research.. *Advances in Food Research*.
- Spence, 2015. Eating with our ears: assessing the importance of the sounds of consumption on our perception and enjoyment of multisensory flavour experiences.
- Spence & Katsunori, 2011. *Effects of Visual Food Texture on Taste Perception*, s.l.: s.n.
- Sprunt, R. S., 2002. Swallow indicator methodology as an enhancement to combined time-intensity measurement of flavour release and electromyography for monitoring mastication.. *Food Quality and Preference*.
- Steele & J., M. A., 2010. Sensory Input Pathways and Mechanisms in Swallowing: A Review.. *Dysphagia* .
- Steele & Miller, 2009. Sensory Input Pathways and Mechanisms in Swallowing: A Review. *Dysphagia*.
- Stokes J. R., B. M. W. B. S. K., 2013. Oral processing, texture and mouthfeel: From rheology to tribology and beyond.. *Current Opinion in Colloid & Interface Science* .
- Stokes & GA., D., 2007. Viscoelasticity of human whole saliva collected after acid and mechanical stimulation. *Biorheology*, .
- Stokes, J. R. & Davies, G. A., 2007. Viscoelasticity of human whole saliva collected after acid and mechanical stimulation.
- Stone, H. S. J. O. S. e. a., 1974. Sensory evaluation by quantitative descriptive analysis.. *Food Technology* .
- Szczesniak, A., 1968. Correlations between objective and sensory texture measurements.. *Food Technology* .

Szczesniak, A., 2002. Texture is a sensory property.

Szczesniak & Hall, 1975. Application of the General Foods Texturometer to Specific Food Products.

Tournier C., G. M. S. C. B. D. S. C., 2013. The impact of mastication, salivation and food bolus formation on salt release during bread consumption.. *Food Funct.*

Van der Bilt, A. E. L. P. L. J. v. d. G. H. W. & A. J. H., 2006. Oral physiology and mastication. *Physiology and Behaviour.*

Vandenberghe-Descamps, M. et al., 2018. Oral comfort: A new concept to understand elderly people's expectations in terms of food sensory characteristics.. *Food Quality and Preference*, 70: 57-67.

Verdi, G., 2017. Titolo del capitolo. In: R. Cristiano, a cura di *Titolo del libro*. Ancona: CasaEditrice, pp. 10-20.

Wang & Chen, 2016. Food oral processing: Recent developments and challenges. *Current Opinion in Colloid & Interface Science.*

Witt T., S. J. R., 2015. Physics of food structure breakdown and bolus formation during oral processing of hard and soft solids.. *Current Opinion in Food Science* .

YOSHIDA, S. Y. S. N. T. T. M., 1970. COLLECTION AND CLASSIFICATION OF WORDS FOR DESCRIPTION OF FOOD TEXTURE.

RINGRAZIAMENTI

Il mio ringraziamento va al professor Pasquale Massimiliano Falcone che per il suo prezioso supporto in questo importante percorso di crescita personale prima ancora che professionale.

Ringrazio i miei titolari che hanno permesso di conciliare lo studio con il lavoro.

Voglio ringraziare la mia famiglia e il mio fidanzato per avermi sostenuto emotivamente incoraggiandomi a portare a termine gli studi dopo due anni di sospensione.