



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI TRIESTE



Dipartimento di  
Ingegneria  
e Architettura

# L'ingegneria delle acque: dalle nuove frontiere tecnologiche alla sostenibilità idraulica del territorio

**Prof. V. Armenio**

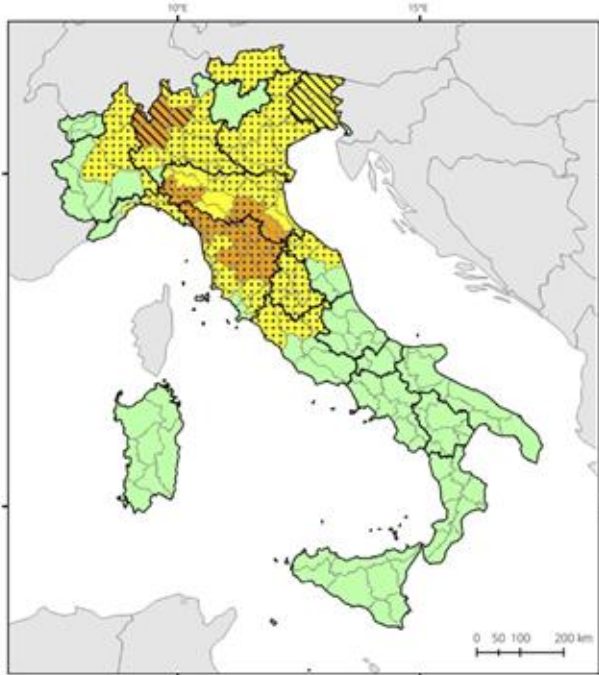
**Prof. F. Roman**

**Prof. M. Cianferra**

**Prof. G. Petris**



# Idraulica: studio del comportamento dell'acqua in relazione alle applicazioni ingegneristiche



LEGENDA DI CRITICITÀ		
<b>RISCHIO IDRAULICO</b>	<b>RISCHIO TEMPORALI</b>	<b>RISCHIO IDROGEOLOGICO</b>
<span style="color: red;">■</span> ELEVATA CRITICITÀ ALLERTA ROSSA	<span style="background-color: orange; border: 1px solid black;">■</span> MODERATA CRITICITÀ ALLERTA ARANCIONE	<span style="color: red;">■</span> ELEVATA CRITICITÀ ALLERTA ROSSA
<span style="background-color: orange; border: 1px solid black;">■</span> MODERATA CRITICITÀ ALLERTA ARANCIONE	<span style="background-color: yellow; border: 1px solid black;">■</span> ORDINARIA CRITICITÀ ALLERTA GIALLA	<span style="background-color: orange; border: 1px solid black;">■</span> MODERATA CRITICITÀ ALLERTA ARANCIONE
<span style="background-color: yellow; border: 1px solid black;">■</span> ORDINARIA CRITICITÀ ALLERTA GIALLA	<span style="background-color: lightgreen; border: 1px solid black;">■</span> ASSENZA DI FENOMENI NESSUNA ALLERTA	<span style="background-color: yellow; border: 1px solid black;">■</span> ORDINARIA CRITICITÀ ALLERTA GIALLA
<span style="background-color: lightgreen; border: 1px solid black;">■</span> ASSENZA DI FENOMENI NESSUNA ALLERTA	<span style="background-color: gray; border: 1px solid black;">■</span> VALUTAZIONE NON TRASMESSA	<span style="border-bottom: 1px solid black;">—</span> Regioni
		<span style="border-bottom: 1px dashed black;">—</span> Zone di allerta



# Le origini

Civiltà Mesopotamica ed Egizia: primi sistemi d'irrigazione.

Canali, argini, serbatoi primitivi.

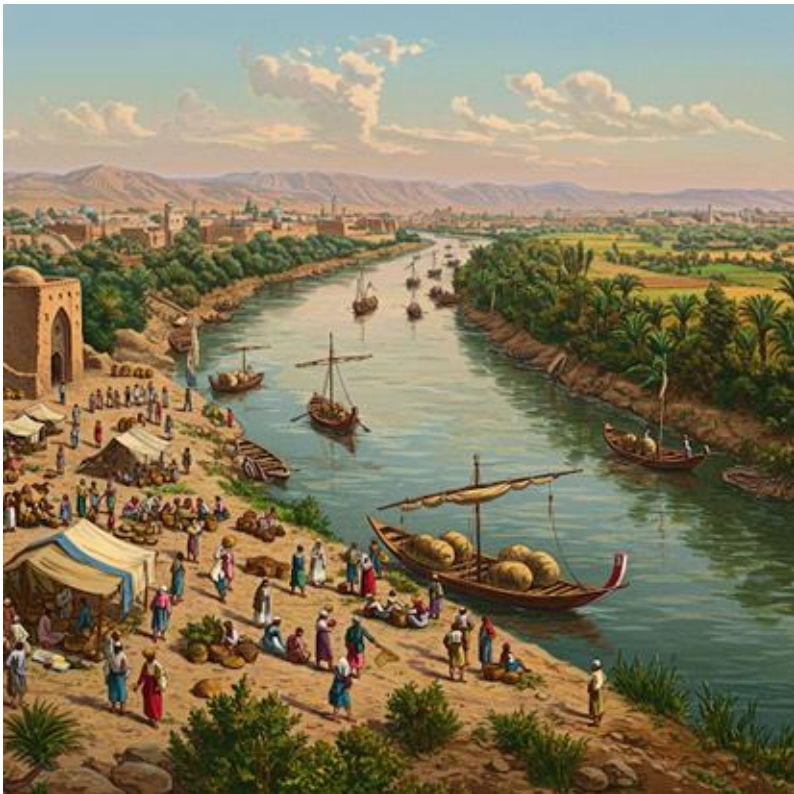


Uso del Nilo per agricoltura: bacini stagionali.

Tecniche idrauliche basate sull'esonazione.

La Mesopotamia, situata tra i fiumi Tigri ed Eufrate, è considerata la culla delle prime civiltà idrauliche. Questi fiumi fornivano acqua per l'irrigazione, permettendo lo sviluppo dell'agricoltura e la nascita di città come Uruk e Babilonia.

# Le origini



**Irrigazione da pro:** I Babilonesi e i Sumeri costruirono **canali artificiali di irrigazione lunghissimi** che deviavano parte del Tigri e dell'Eufrate per alimentare campi coltivati. Usavano sistemi di chiuse e leve in argilla e legno – un'**idraulica di precisione** prima ancora dell'invenzione del ferro.

**Scrittura nata per colpa del grano:** I primi testi scritti in cuneiforme... parlano di **contabilità agricola**. Tipo: "10 sacchi di grano dal campo accanto al Tigri". L'alfabeto? No no, prima le tasse.

**Il delta mobile:** I fiumi cambiavano letto spesso, creando un **paesaggio sempre in evoluzione**. Gli abitanti dovevano ricostruire canali e città ogni volta che il fiume decideva di "traslocare".

**Sistema fognario ante litteram:** I Sumeri erano fissati con la pulizia. Alcune città, tipo Uruk, avevano **canali di scolo** per gestire le acque reflue. Come lo sciacquone... solo con più fango.

**La prima lite per l'acqua della storia:** Città-stato come Lagash e Umma si facevano **la guerra per i diritti di irrigazione**.

# L'idraulica in Grecia

## La Vite di Archimede

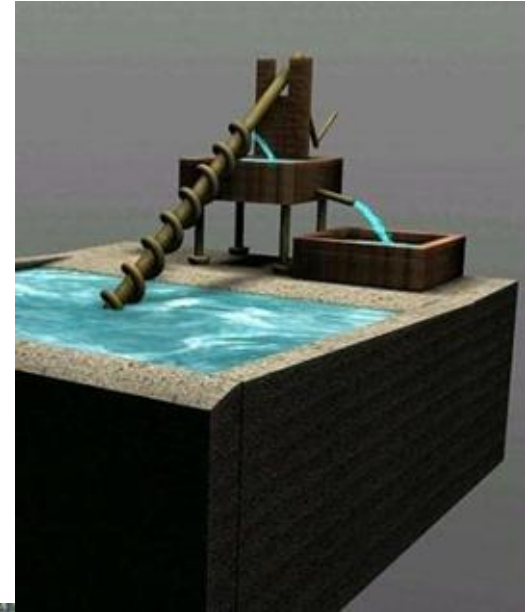
La "vite" è un dispositivo meccanico usato per **sollevare l'acqua** da un livello inferiore a uno superiore. È costituito da una spirale avvolta intorno a un asse dentro un tubo inclinato.

### Funzionamento:

- Quando si ruota l'asse, l'acqua intrappolata nelle spire viene trasportata verso l'alto.
- È ancora usata oggi in sistemi di irrigazione, impianti di sollevamento e perfino in centrali idroelettriche a basso salto.

### Applicazioni antiche:

- Irrigazione dei campi in Egitto e Mesopotamia.
- Prosciugamento di miniere o terreni paludosi.



# L'idraulica in Grecia

Archimede non si è limitato all'ingegneria pratica: ha anche gettato le basi della **meccanica dei fluidi** con i suoi studi sul galleggiamento.

## Il Principio di Archimede:

*"Un corpo immerso in un fluido riceve una spinta verso l'alto pari al peso del fluido spostato."*

Questo principio è fondamentale ancora oggi per:

- Navi e sommergibili
- Idrometri
- Calcoli di spinta e portanza nei fluidi



Archimede secondo Chat GBT



# Acquedotti Romani



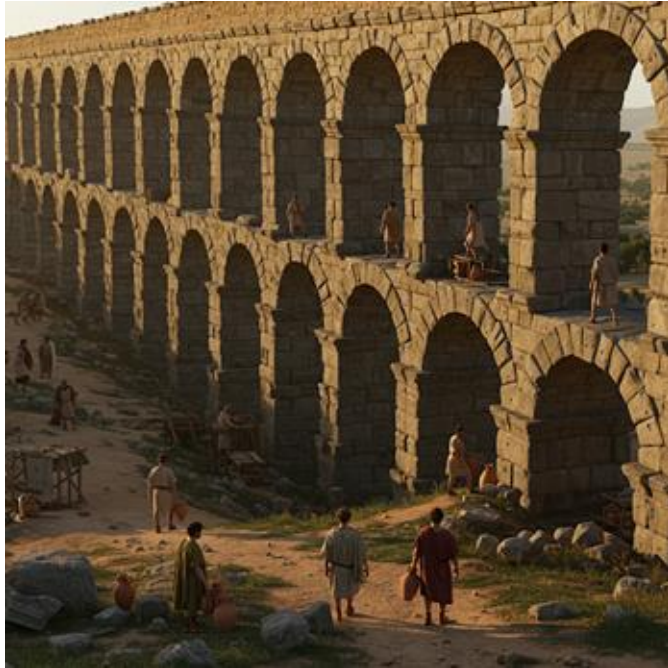
*A.S. Roma*



Sistemi complessi di acquedotti per alimentare le città, costruzione delle fognature.

I Romani costruirono numerosi acquedotti per trasportare acqua potabile nelle città, alimentando terme, fontane e abitazioni. Esempi notevoli includono l'Acquedotto Claudio e il Pont du Gard in Francia.

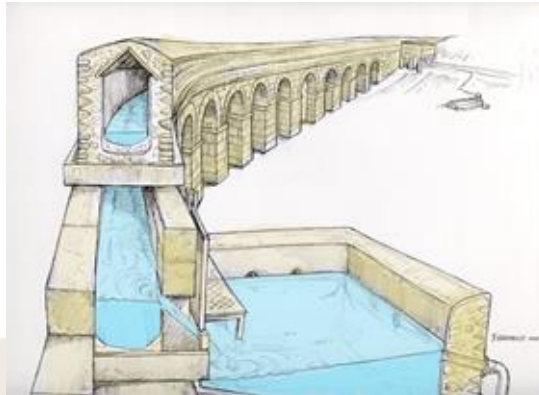
# Acquedotti Romani



**Pendenza perfetta:** Gli acquedotti romani avevano una pendenza media di **circa 1 metro ogni 4800 metri** (0,02%) — roba da fare impallidire anche un ingegnere moderno. Mantenevano un flusso costante senza l'ausilio di pompe!

**Contro la gravità... con l'ingegno:** Dove non potevano costruire ponti o scavare gallerie, i romani usavano **sifoni invertiti**, un sistema di tubi che sfruttava la pressione dell'acqua per risalire colline dopo essere scesa, un principio simile a quello del tubo a U o dei vasi comunicanti.

**Lunghezza incredibile:** Solo a Roma, nel 52 d.C., si stima che ci fossero **quasi 500 km di acquedotti**, di cui 47 km in superficie su arcate. Un'opera da ingegneri... con l'ossessione per l'idraulica.



<https://www.slideshare.net/slideshow/acquedotti-romani-capolavoro-di-ingegneria/91012375#6>

# Acquedotti Romani

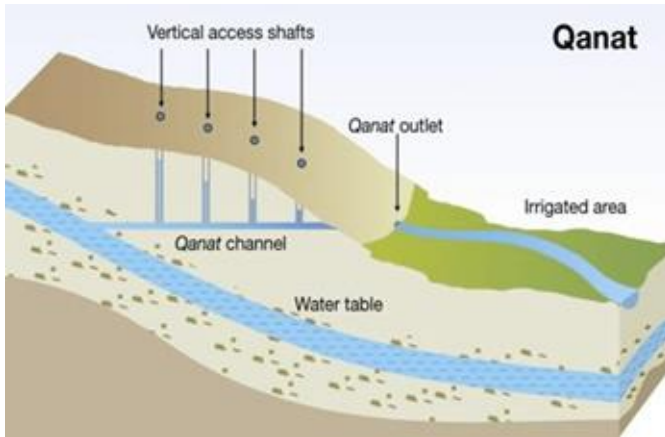


**Acqua per VIP:** In epoca imperiale, *non tutta l'acqua era uguale*. C'erano acquedotti riservati solo alle élite! Per esempio, l'Aqua Marcia era considerata l'acqua "di lusso", fresca e pulita, mentre l'Aqua Alsietina era usata solo per *naumachie* (battaglie navali simulate) e giardini. Sì, avevano un'acqua da giardino.

**Gli ispettori dell'acqua, ovvero i Karens dell'Impero:** C'erano funzionari pubblici chiamati *curatores aquarum* che facevano controlli rigorosi per scoprire chi si attaccava abusivamente agli acquedotti. Alcuni cittadini "piratavano" l'acqua per uso personale, e c'erano multe salate.

**L'inventore del tubo flessibile:** I romani usavano **canne di piombo** per portare l'acqua in città. Un po' geniale, un po' mortale, visto che oggi sappiamo quanto il piombo sia tossico. Ma all'epoca, era il top della tecnologia!

# Qanat Persiani e recenti rivisitazioni



I qanat persiani erano una serie di cunicoli verticali simili a pozzi, collegati da un canale sotterraneo in lieve pendenza. Il canale partiva abitualmente da una falda acquifera e permetteva di trasportare l'acqua a grandi distanze, sfruttando la forza di gravità, senza perderne una gran parte per l'evaporazione.

Questo principio è stato ripreso ed attualizzato dagli ingegneri che hanno sviluppato il progetto **Cartuja Qanat di Siviglia**: lo scopo non è più trasportare l'acqua, ma usarla per raffreddare una ampia porzione di un quartiere e forse, in futuro, della città. Il canale sotterraneo trasporterà acqua fredda, un sistema di feritoie verticali consentiranno all'aria fresca di arrivare in superficie, creando delle zone raffreddate in modo naturale.

Secondo il progetto queste misure porteranno a una riduzione delle temperature di 10 gradi e saranno efficaci fino a temperature esterne di 41 gradi.



# Prime opere di produzione di energia



Un mulino ad acqua usa **l'energia dell'acqua in movimento** (di un fiume o di un canale) per far girare una ruota. Questa ruota muove **ingranaggi** che possono macinare grano, segare legno, pestare metalli, o addirittura produrre carta.

**Anticipano la rivoluzione industriale e sono Eco-friendly!**

**I Romani ci sono arrivati prima:** Gli antichi romani usavano mulini già nel I secolo a.C. Uno dei più famosi era il **Complesso di Barbegal** (vicino Arles, in Francia), con **16 mulini a cascata** — la prima fabbrica industriale della storia.

Nel Medioevo, avere un mulino era uno **status symbol**. I signori feudali li controllavano perché portavano soldi: chi voleva macinare, doveva pagare.

**Leonardo da Vinci li upgrade-ava:** Ha progettato **mulini più efficienti**, con sistemi automatici per regolare il flusso d'acqua. Leonardo, come al solito, faceva over-engineering anche delle cose che funzionavano già.

- Il rendimento? Fino al **70% dell'energia dell'acqua** veniva sfruttata!



# Trasporto marittimo - Suez



## 🔧 Un'idea lunga 4.000 anni

- Già i faraoni avevano provato a connettere il Nilo al Mar Rosso con dei proto-canali (tipo Sesostri III, 1800 a.C.). Ma erano progetti a metà, spesso interrati dalla sabbia o abbandonati.
- **Fu Napoleone**, nel 1798, a riportare l'idea in auge. Il suo team calcolò male le altitudini e pensò fosse *impossibile*. Oops.

## 🚢 Inaugurazione da star (1869)

- Il Canale venne costruito dal francese Ferdinand de Lesseps.
- L'inaugurazione fu un **evento VIP imperiale**: cene, spettacoli, e addirittura la **prima dell'opera "Aida"** di Verdi, commissionata per l'occasione.

È ancora oggi uno snodo vitale: **12% del commercio mondiale passa di lì.**

L'incaglio di una nave nel canale qualche anno fa ha messo in crisi il commercio mondiale per qualche settimana !

# Trasporto marittimo - Panama



## Da sogno spagnolo a incubo francese

- Già nel 1500, i conquistadores pensavano: "E se ci fosse un passaggio tra Atlantico e Pacifico...?"
- Il primo tentativo moderno fu ancora di **Ferdinand de Lesseps** (sì, quello di Suez), ma finì **malissimo**:
  - Malattie tropicali (malaria, febbre gialla)
  - Frane, piogge, errori tecnici
  - Fallimento clamoroso → **30.000 morti** e uno scandalo finanziario epico in Francia.

## Gli USA entrano in scena (1904–1914)

- Costruiscono **chiuse colossali** e uno dei laghi artificiali più grandi dell'epoca (Gatun Lake).
- Viene inaugurato nel 1914

## Un'opera incredibile dell'ingegneria

- Il canale non è "piatto": le navi **vengono sollevate e abbassate** tramite chiuse per attraversare l'istmo.
- Ci sono **squadre di locomotive** chiamate *muli* che aiutano a guidare le navi nelle chiuse (tuttero).

# Le grandi opere idrauliche

Le dighe moderne rappresentano straordinarie opere di ingegneria idraulica.

Ad esempio, la Diga di Santa Chiara in Sardegna, costruita tra il 1918 e il 1924, ha dato origine al lago Omodeo, il bacino più grande d'Europa all'epoca.

La Diga delle Tre Gole in Cina e la Diga di Assuan in Egitto, sono esempi di ingegneria avanzata per il controllo delle acque.



Santa Chiara del Tirso - La Diga



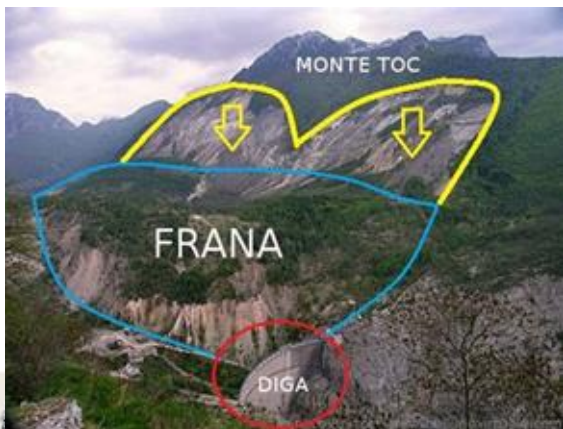
# Le grandi opere idrauliche



Altri esempi: Vajont, Hoover dam

Vajont grande opera di Ingegneria Idraulica, resiste al carico idraulico rappresentato dal passaggio di un'onda di oltre 200 metri

La tragedia dovuta ad errore di valutazione da parte Geotecnica!



Le dighe ancora oggi rappresentano un sistema eccellente e eco-friendly di produzione di energia e di gestione di risorse idriche

# Le grandi opere idrauliche



## 1. Delta Works (Paesi Bassi) – L'ingegneria che sfida l'oceano

- Un colossale sistema di **dighe mobili, barriere anti-marea e canali di deflusso** progettato per **proteggere i Paesi Bassi dalle inondazioni**.
- Dopo la tragica alluvione del 1953, i Paesi Bassi hanno detto: “Mai più”, e hanno costruito uno dei sistemi di **difesa costiera più avanzati al mondo**.

## Perché è futuristico

- La barriera più famosa, l'**Oosterscheldekering**, è una **serie di dighe mobili** che si **chiudono automaticamente** solo in caso di tempeste o alte maree.
- Sono alimentate da **sistemi di sensori, intelligenza artificiale e controlli automatici**.

## Curiosità

- I Paesi Bassi sono **per il 26% sotto il livello del mare**.
- I Delta Works sono talmente ben progettati da essere considerati una delle **7 meraviglie del mondo moderno** dall'ASCE (American Society of Civil Engineers).
- In olandese esiste una parola: **“poldermodel”**, che viene da qui, e indica il compromesso perfetto tra uomo e natura.

# Le grandi opere idrauliche



## 2. Marina Barrage (Singapore) – La diga urbana multifunzione

- È una **diga costruita nel cuore della città di Singapore**, che serve **tre scopi contemporaneamente**:
  1. **Controllo delle inondazioni**
  2. **Raccolta dell'acqua dolce**
  3. **Zona ricreativa cittadina** (ci vanno a fare picnic e kite surf!)

### Perché è smart

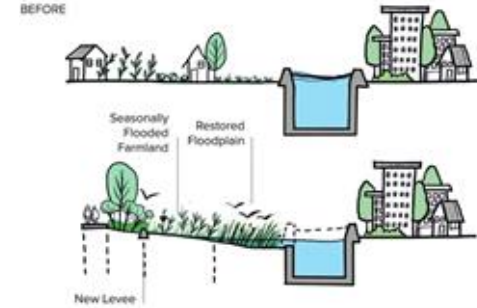
- Il bacino che crea raccoglie l'acqua piovana da una **superficie urbana enorme**, e la purifica per renderla potabile.
- In caso di marea alta o piogge torrenziali, **pompe giganti** si attivano automaticamente per rilasciare l'acqua in eccesso nel mare.
- Il tutto è gestito da una **centrale computerizzata** che analizza meteo, maree e livelli in tempo reale.
- È anche un'opera di architettura sostenibile: pannelli solari, parco verde sul tetto e attività didattiche.



# Nuove tecnologie

## 🔥 1. Il futuro non è (solo) prevenzione, è soprattutto adattamento

- Gli scienziati dicono chiaro: **i cambiamenti climatici sono ormai irreversibili in molte aree**. Piogge estreme, innalzamento del mare, desertificazione...
- Le città del futuro dovranno essere **resilienti**, non solo protette.
- Parola chiave: **adattabilità climatica**.



## 1. Il futuro non è (solo) prevenzione, è adattamento

- Gli scienziati dicono chiaro: **i cambiamenti climatici sono ormai irreversibili in molte aree**. Piogge estreme, innalzamento del mare, desertificazione...
- Le città del futuro dovranno essere **resilienti**, non solo protette.
- Parola chiave: **adattabilità climatica**.

### **Rigenerazione anziché controllo**

- Le città non dovranno solo “resistere” all’acqua... ma **collaborarci**.
- Dighe che diventano **parchi urbani**, zone allagate che diventano **habitat biodiversi temporanei**.

### **Natura 2.0**

- L’ingegneria del futuro sarà **ibrida**: tecnologia + ecosistemi.
- Paludi urbane, foreste filtranti, **barriere coralline artificiali** per rallentare le onde — non contro la natura, **con** la natura.

## COME SARÀ L'INGEGNERIA IDRAULICA DEL FUTURO?

### Città anfibie

- Case su piattaforme galleggianti, ponti che si alzano automaticamente, **quartieri che si spostano** come zattere.
- Canada, Olanda, Indonesia e Maldive stanno già testando i primi **prototipi di città galleggianti**.

### Dighe “intelligenti”

- Con AI e IoT: dighe che **capiscono da sole quando aprirsi o chiudersi** in base a dati meteo e maree.
- Potrebbero addirittura **“parlare” tra loro**, formando una rete idraulica interconnessa.

### Trattamento acque avanzato (e riciclo estremo)

- Fognature del futuro? Impianti sotterranei che **ripuliscono le acque reflue al punto da renderle potabili** in tempo reale (già si fa a Singapore).

### Bioingegneria: batteri che puliscono

- Organismi modificati per **mangiare metalli pesanti e microplastiche** nell'acqua e nell'aria.

# Nuove tecnologie



<https://www.bimportale.com/dogen-city-la-citta-galleggiante-giapponese/>

<https://www.stogda.pl/2017/08/innovative-floating-dock-marco-polo-forwarded-to-the-owner/>

<https://edition.cnn.com/2015/09/24/sport/gallery/migaloo-submersible-yacht-floating-island/index.ht>



# Qualche principio di base

L'equazione di Bernoulli:

in assenza di effetti dissipativi, e in condizioni stazionarie,  
l'energia fluidodinamica di un sistema si conserva

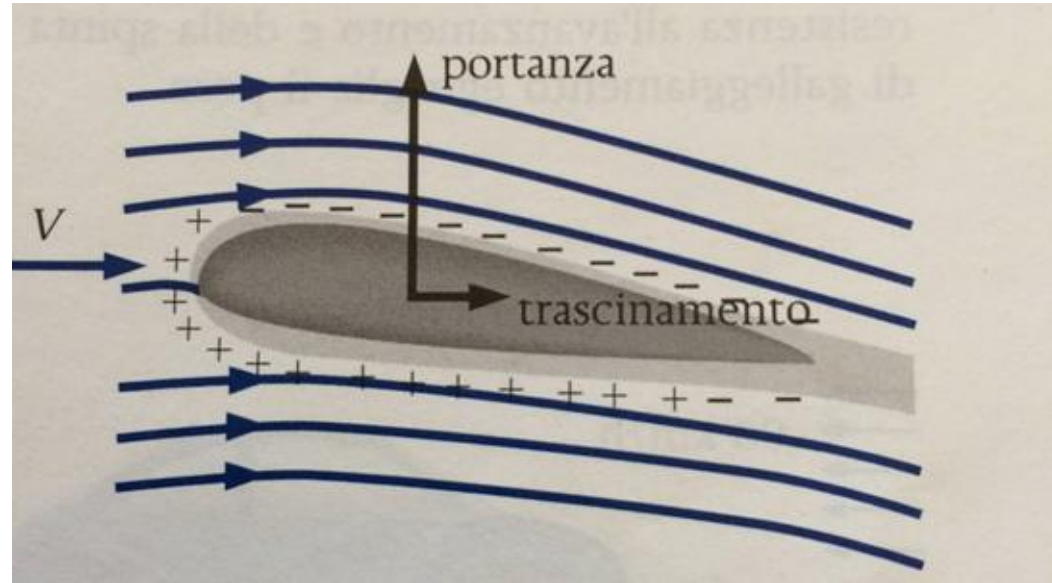
$$e_{f,m} = \underbrace{gz + \frac{p}{\rho}}_{\text{energia potenziale}} + \underbrace{\frac{v^2}{2}}_{\text{energia cinetica}}$$

a parità di altezza di una vena fluida, se aumenta la velocità diminuisce la pressione!

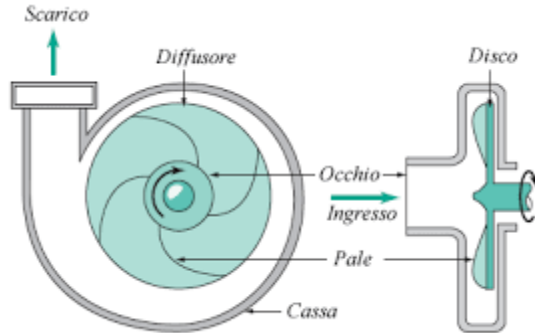
# Conseguenze dell'equazione di Bernoulli: portanza

Un fluido che fluisce intorno ad un corpo affusolato, viaggia con velocità differenti sulle due superfici e sviluppa due differenti campi di pressione

La differenza di pressione produce una forza ortogonale alla direzione del moto

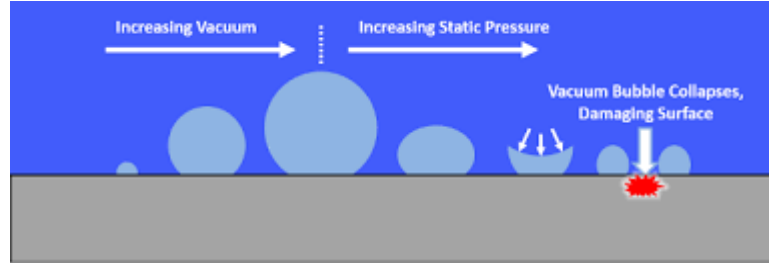


# Portanza: Dove interviene?



# Portanza - effetti collaterali: cavitazione

In un liquido (i.e. acqua), se a seguito dell'aumento di velocità in una regione di fluido la pressione scende al di sotto della tensione di vapore (valore di pressione alla quale il liquido passa dalla fase liquida a quella gassosa) allora si formano bolle di vapore all'interno del liquido. Quando queste bolle si spostano in regioni ad altra pressione, implodono con effetti distruttivi sui manufatti



<https://www.youtube.com/shorts/IZ0A2LbyEfg>

# Sviluppo corsi

## Laurea Triennale Meccanica dei Fluidi (III anno); Principi e applicazioni di Ingegneria Idraulica 3+3 CFU, (III anno, a scelta):

- Modulo 1 Ingegneria idraulica per le applicazioni ambientali;
- Modulo 2 Ingegneria idraulica per la gestione delle acque e per la protezione del territorio

## Laurea Magistrale

### Principles of Hydraulics Engineering:

*1 - Hydraulics (I anno)*

*2 - Hydraulic Structures (I anno)*

### Environmental Hydraulics:

*1 - Environmental Hydraulics: pollutants, emissions and global warming (I anno)*

*2 - Water treatment and ground water remediation techniques (I anno)*

Maritime Hydraulics: waves, energy system and shore protection (II anno)

Computational Hydraulics (II anno)

Gestione della risorsa idrica: (II anno)

*1 - Reti Idrauliche (II anno)*

*2 - Ciclo idrico integrato (II anno)*

Gestione e sostenibilità ambientale del territorio:

*1- Sostenibilità idraulica del territorio (II anno)*

*2- Gestione del rischio ambientale e industriale (II anno)*

Advanced Fluid Mechanics (a scelta)

INGEGNERIA CIVILE SOSTENIBILE :  
PERCORSO GESTIONE E SOSTENIBILITÀ  
IDRAULICA E AMBIENTALE

