

Výpočetní síť

Petr Šidlof

Česko-anglický slovník termínů v CFD

Česky	Anglicky
výpočetní síť	computational mesh (grid)
vrchol (uzel) sítě	node, vertex, grid point
hrana sítě	edge
stěna elementu	face
element	cell, element
(ne)konformní síť	(non)-conforming mesh
(ne)strukturovaná síť	(un)structured mesh
blokově strukturovaná	block-structured
čtyřstěn	tetrahedron
šestistěn (kvádr)	hexahedron
poměr stran	aspect ratio
adaptivní zjemňování	adaptive refinement

Výpočetní síť v CFD

Formulace problému

- co je cílem řešení – jaké potřebujeme výsledky
- které fyzikální jevy bude model řešit a které zanedbá

Preprocessing

- modelování geometrie (CAD)
- generování výpočetní sítě
- nastavení modelu / solveru / rovnic
- okrajové a počáteční podmínky

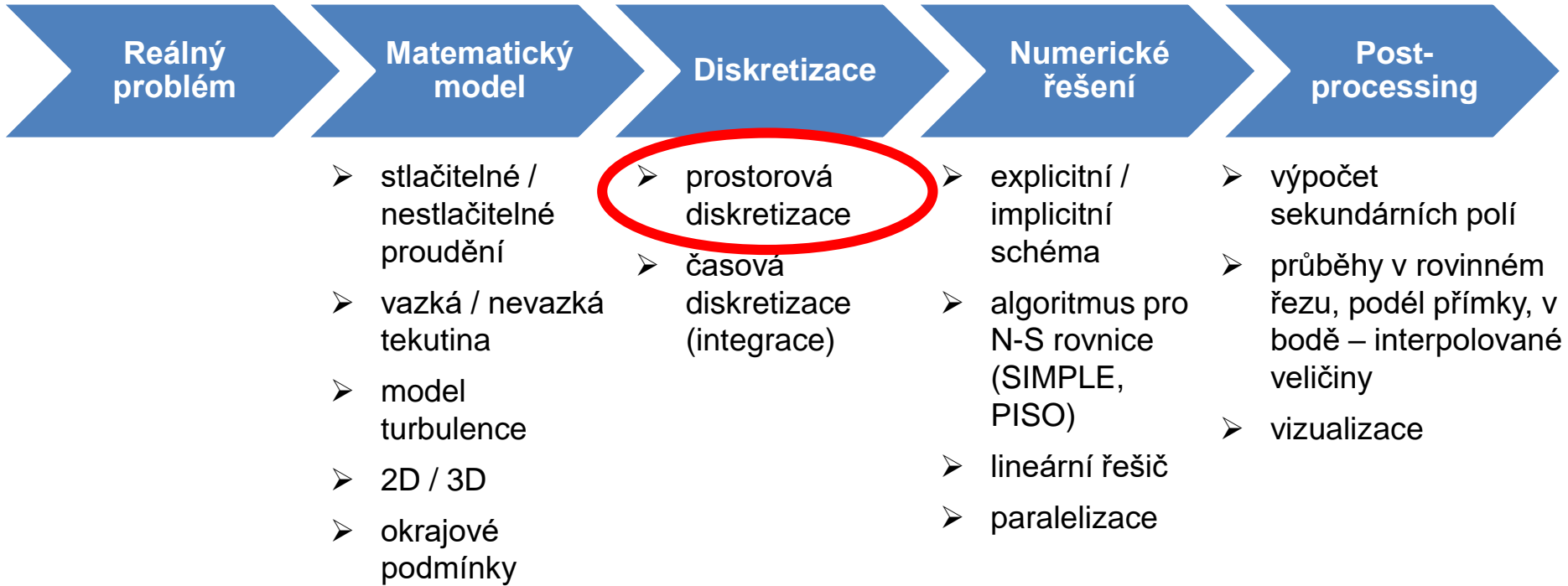
Řešení

- sériový nebo paralelní výpočet
- kontrola konvergence výpočtu

Postprocessing

- výpočet sekundárních polí
- průběhy v řezu, v bodě
- vizualizace výsledků – 3D pohledy, 2D řezy, proudnice, grafy, animace

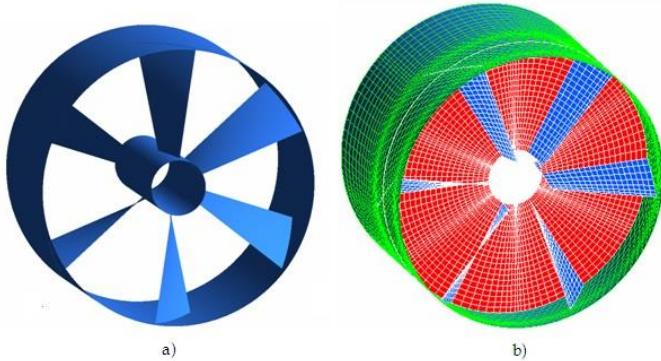
Výpočetní síť v CFD (2)



Kvalita a vlastnosti výpočetní sítě mají naprosto zásadní vliv na

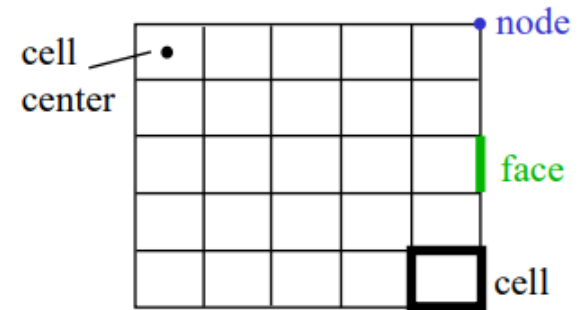
- přesnost výsledků simulace
- konvergenci
- výpočetní náklady, paměťové nároky a diskový prostor

Terminologie (1)

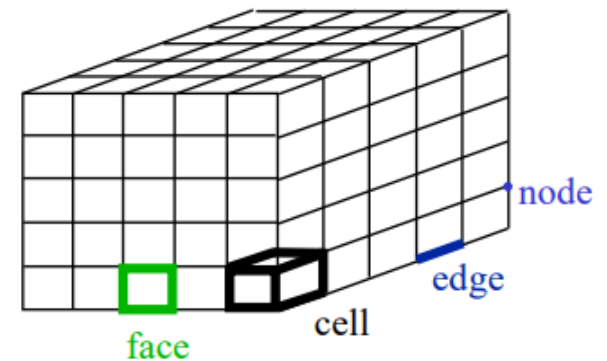


- a) (CAD) geometrie
- b) výpočetní síť

- element / buňka sítě (cell, element) – 3D (2D)
- stěna element (face) – 2D (1D)
- hrana element (edge) – 1D
- vrchol / uzel elementu (node, vertex, grid point) – 0D



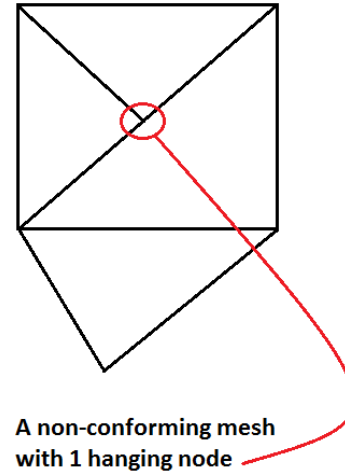
2D computational grid



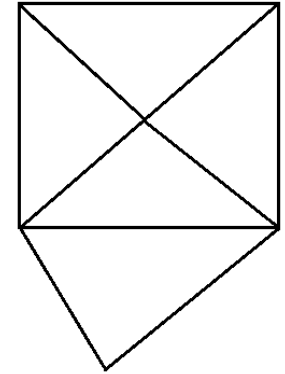
3D computational grid

Terminologie (2)

- výpočetní síť: množina mnohoúhelníků (2D) nebo mnohostěnů (3D), která kompletně pokrývá výpočetní oblast
- konformní síť: průnikem dvou elementů je buď
 - společná stěna
 - společná hrana
 - společný vrchol
 - nic



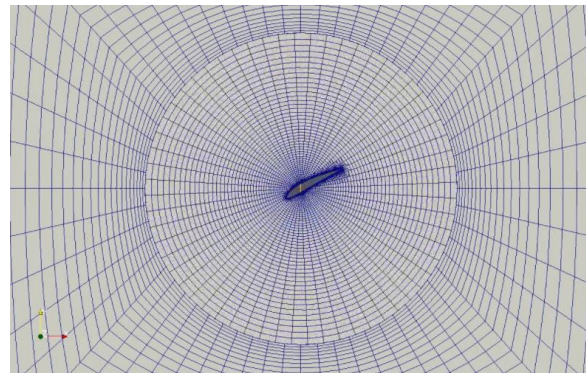
A non-conforming mesh
with 1 hanging node



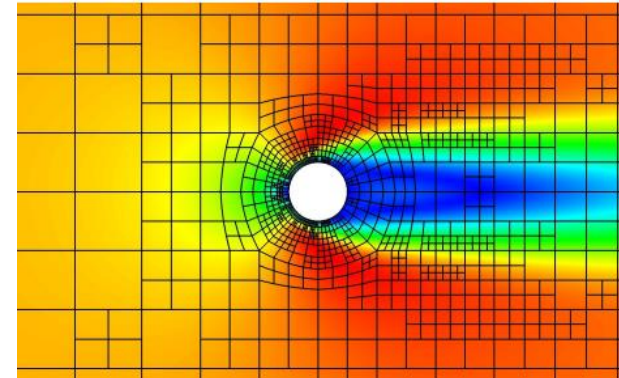
A conforming mesh

Nekonformní sítě

- v případě MKO jsou numerické toky interpolovány
- použití:



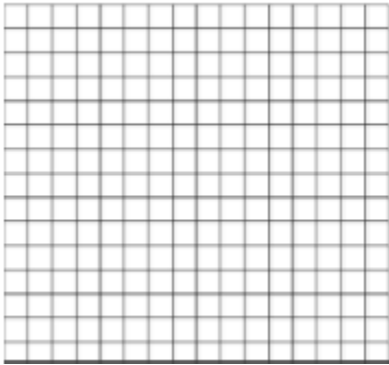
- rotační stroje a vzájemně se pohybující oblasti



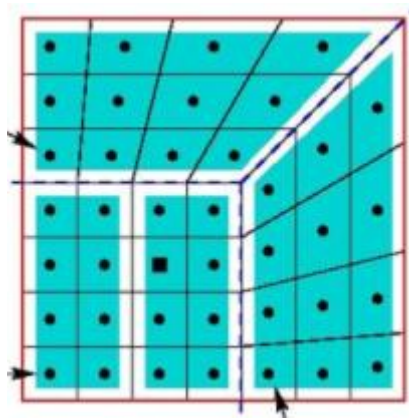
- adaptivně zjemněné sítě

Typy výpočetních sítí

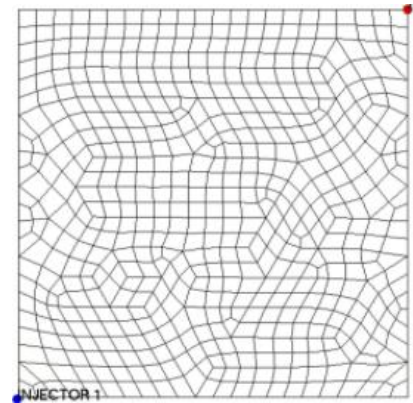
Strukturované sítě
(structured grids)



Blokově strukturované sítě
(block-structured grids)

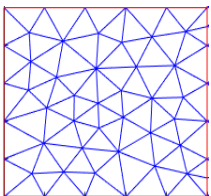


Nestrukturované sítě
(unstructured grids)

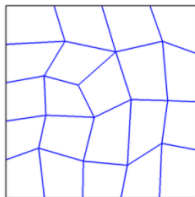


2D

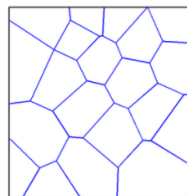
Trojúhelníková
(triangular)



Čtyřúhelníková
(quadrangular)



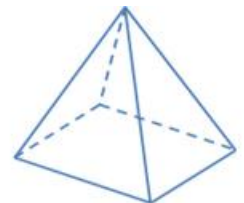
Polygonální
(polygonal)



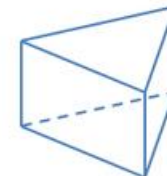
3D



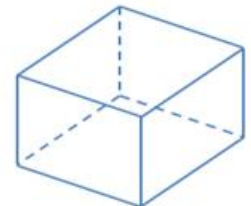
Tetrahedron



Pyramid



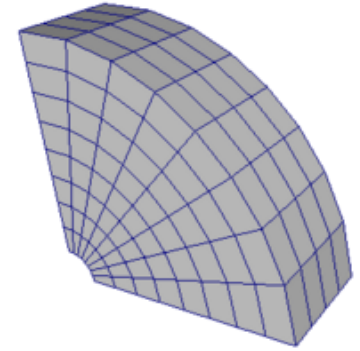
Triangular Prism



Hexahedron

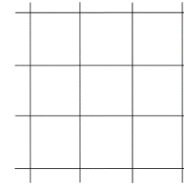
Strukturované sítě

- všechny elementy lze adresovat pouze pomocí indexů i, j, k ve třech směrech (3D)
- teoreticky není nutné ukládat konektivitu elementů ani souřadnice vrcholů – pro některé řešiče (např. MKD) výrazná úspora paměti
- vhodné pro jednoduché geometrie, mezní vrstvy

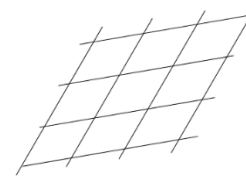


- Typ hran a stěn:

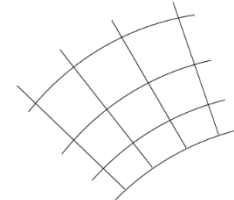
- kartézské (Cartesian)
- zkosené (affine)
- křivočaré (curvilinear)



Cartesian



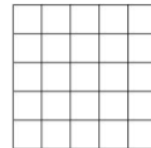
Affine



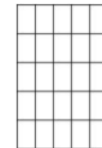
Curvilinear

- Rozměry elementů:

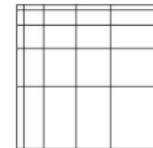
- rovnoměrné (uniform)
- stupňované (graded, rectilinear)



uniform



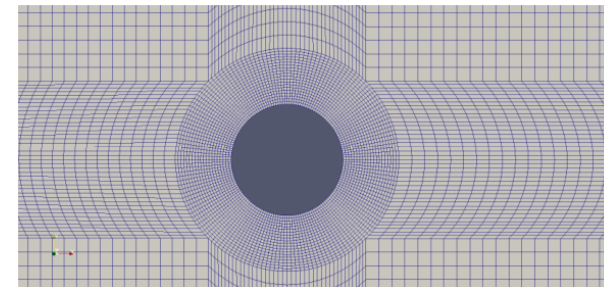
regular



rectilinear

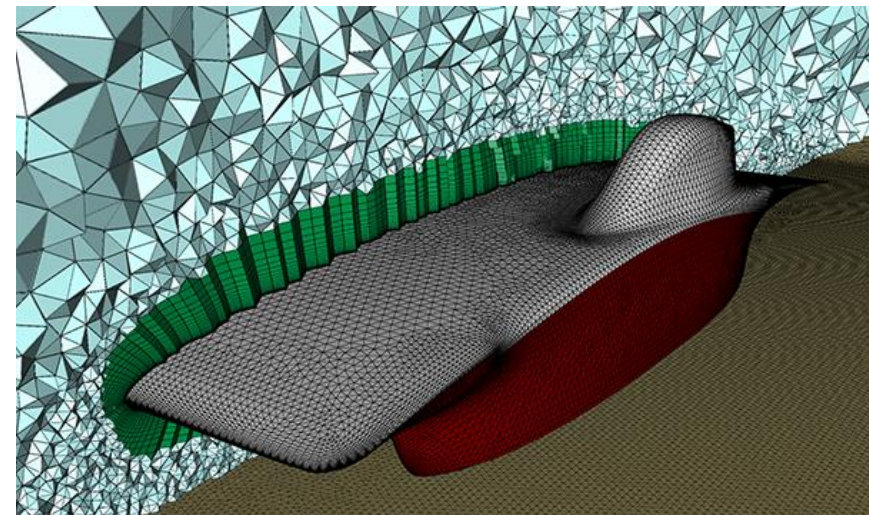
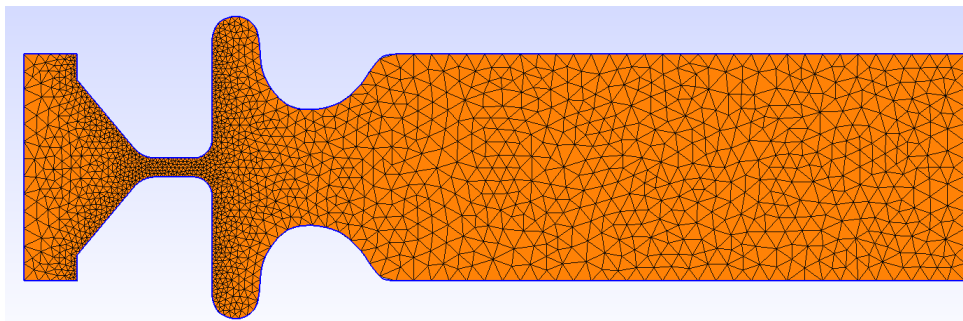
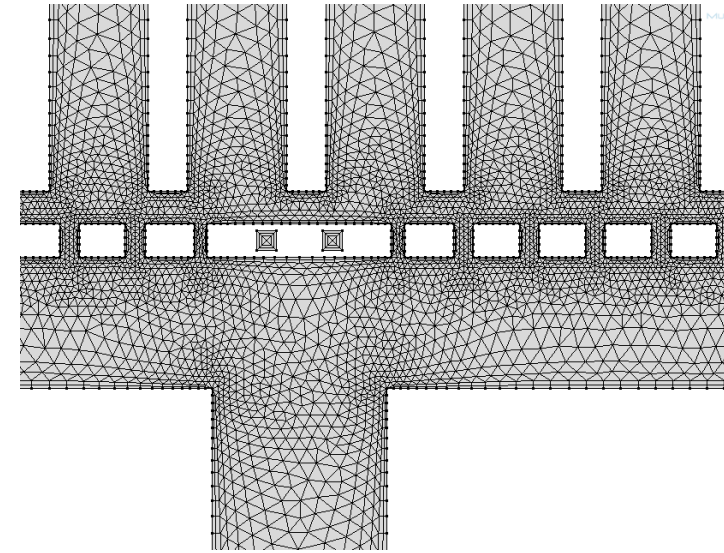
Blokově strukturované sítě

- několik bloků, ve kterých je síť strukturovaná
- umožňuje o něco větší flexibilitu a zasíťování složitějších objemů



Nestrukturované sítě

- elementy libovolně a nepravidelně uspořádané v prostoru
- nutné ukládat konektivitu a indexování elementů – vyšší zatížení paměti a CPU
- průmyslový standard, pro složitější geometrie jediná možnost
- automatické algoritmy pro síťování CAD geometrií
 - trojúhelníkové a čtyřúhelníkové ve 2D
 - tetrahedrální a hexahedrální ve 3D
- lepší možnosti lokálního zjemnění / hrubnutí sítě v oblastech s velkými / malými gradienty

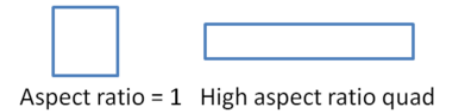
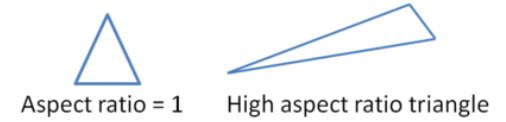


Kvalita výpočetní sítě – tvar elementů (1)

Poměr stran (aspect ratio)

$$AR = \frac{\text{nejdelší rozměr}}{\text{nejkratší rozměr}}$$

- vysoký poměr stran nemusí vadit, např. mezní vrstvy – quad/hex síť s prouděním
- AR = 1 .. ideální element. AR = 0 .. nejhorší element



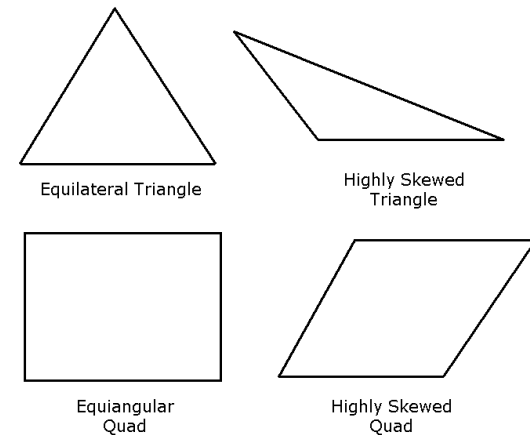
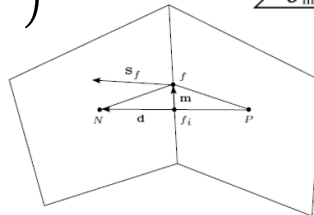
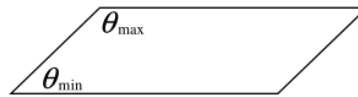
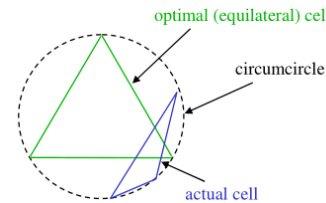
Šikmost (skewness)

Různé definice:

- $S = \frac{\text{objem ideálního elementu} - \text{objem elementu}}{\text{objem ideálního elementu}}$

- $S = \max\left(\frac{\theta_{max} - 90}{90}, \frac{90 - \theta_{min}}{90}\right)$

- OpenFOAM: $S = \frac{|m|}{|d|}$

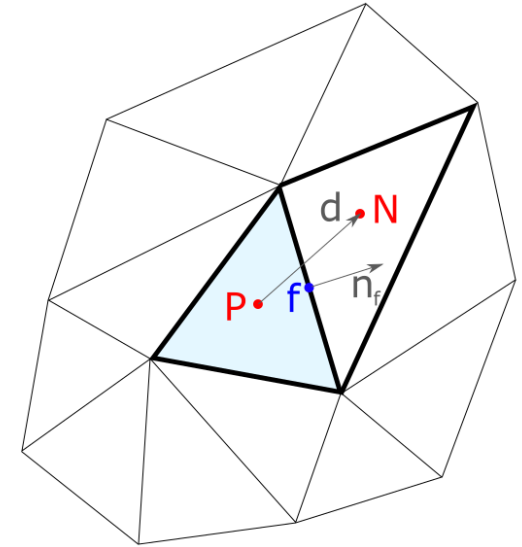


S = 1 .. nejhorší element. S = 0 .. ideální element

Kvalita výpočetní sítě – tvar elementů (2)

Ortogonalita (orthogonality)

- OpenFOAM: úhel mezi spojnicí těžišť \mathbf{d} sousedních elementů a normálou \mathbf{n}_f ke společné hraně



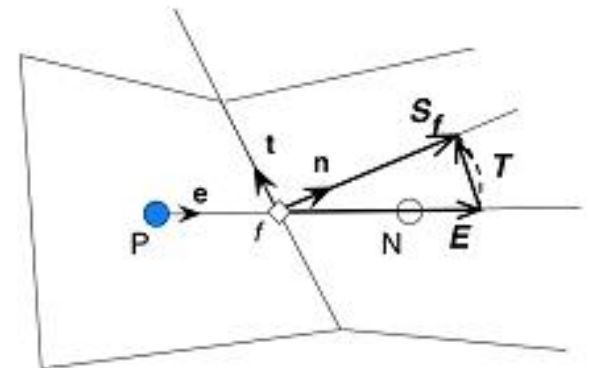
Diskretizace difuzního členu:

$$(\nabla\Phi)_f \cdot \mathbf{n}_f S_f = \frac{S_f(\Phi_N - \Phi_P)}{|\mathbf{d}|} \quad \dots \text{funguje pouze pro ortogonální síť, pro neortogonální zavádí chybu}$$

Neortogonální síť:

$$(\nabla\Phi)_f \cdot \mathbf{n}_f S_f = (\nabla\Phi)_f \cdot \mathbf{E} + (\nabla\Phi)_f \cdot \mathbf{T}$$

neortogonální korektor

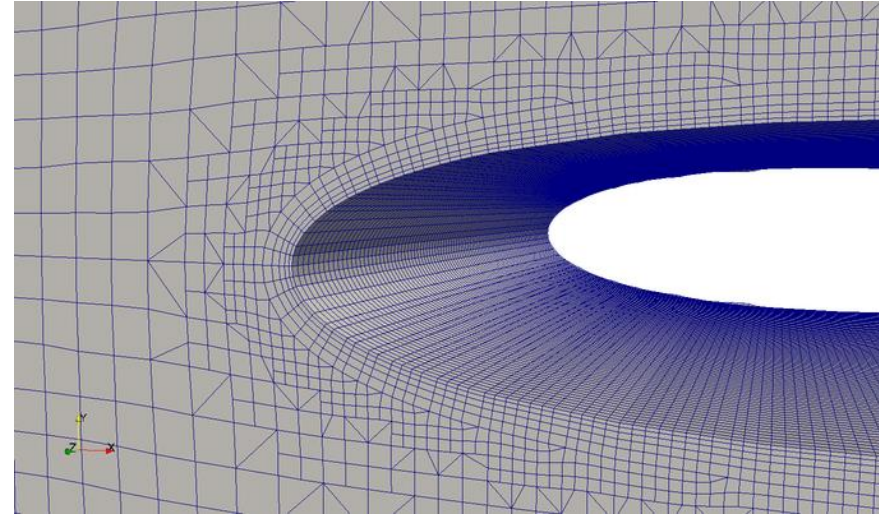


Kvalita výpočetní sítě – velikost elementů

Ideální případ (z hlediska numeriky): všechny elementy stejně velké

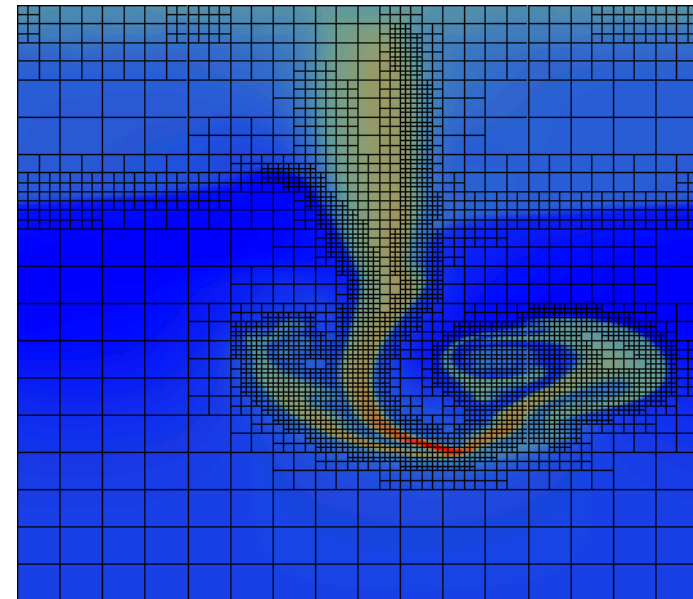
Často žádoucí udělat výjimku:

- zachycení gradientů v řešení – mezní a smykové vrstvy, úplavy, rázové vlny: dostatečně jemné elementy
- neuniformní a lokálně zjemněné sítě: plynulé přechody z jemných do hrubých elementů



Adaptivní zjemňování

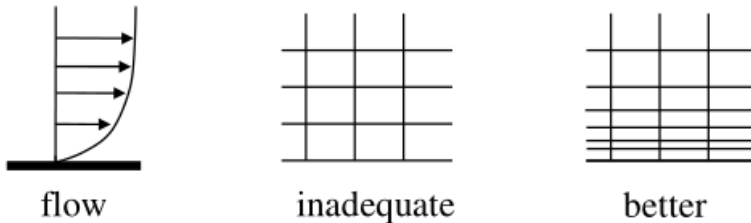
automatické zjemňování sítě v závislosti na vhodné veličině vyhodnocené z řešení



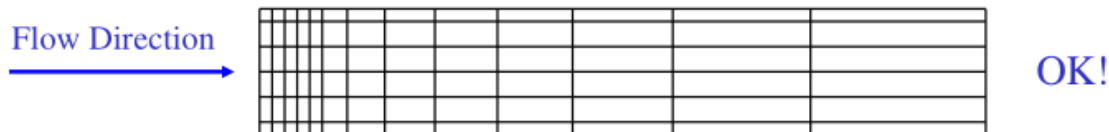
Obecná doporučení při tvorbě sítě (1)

Nekvalitní síť – nepřesné a nekonvergující řešení

- kontrolovat, zda síť zachycuje všechny podstatné aspekty proudění



- pokud je to možné, (blokově) strukturované sítě obvykle dávají lepší výsledky než nestrukturované
- minimalizovat šikmost a neortogonalitu elementů
- poměr stran elementů blízký 1. V oblastech, kde je proudění jednorozměrné, lze ale použít i čtyřúhelníky (2D) / šestistěny (3D) s vysokým poměrem stran

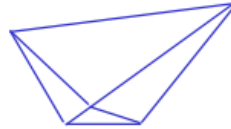


Obecná doporučení při tvorbě sítě (2)

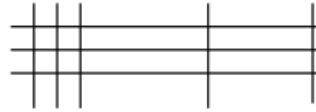
- neuniformní síť: změna velikosti elementů musí být plynulá (grading < 20%)



smooth change
in cell size



sudden change
in cell size — **AVOID!**



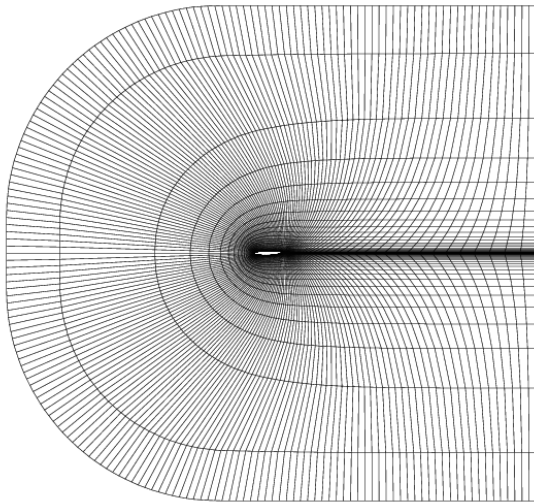
André Bakker – CFD course,
Dartmouth College

- celkový počet elementů sítě: více elementů -
 - přesnější řešení, zachycení více detailů
 - zvýšené nároky na RAM a CPU

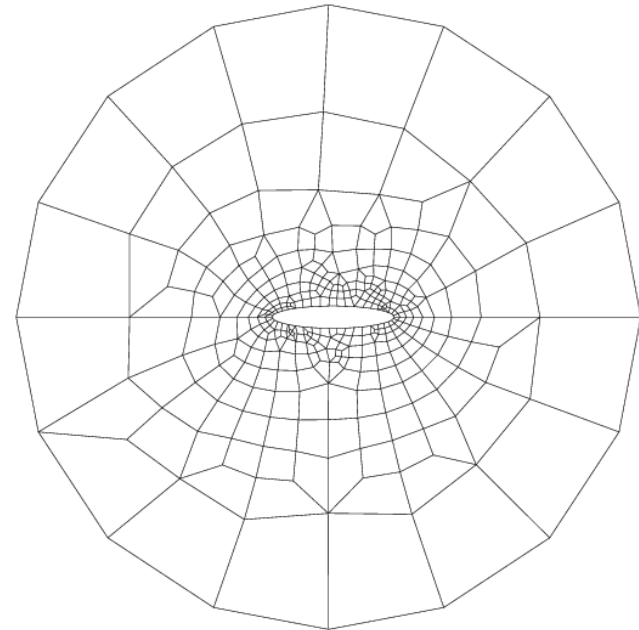
Počet elementů	Typický případ (MKO pro nestacionární nestlačitelné proudění)
10k	Ověření nastavení, OP, jednoduché 2D případy. Řešení v rádu sekund až minut na 1 CPU
100k	Detailnější 2D úlohy, hrubé 3D sítě. Řešení v rádu minut až hodin na 1 CPU
1M	Detailní 3D sítě, na 1CPU nepraktické. Nutnost paralelizace. Obtížně paralelizovatelné části (tvorba sítě, postprocessing) mají značné nároky, nutnost manipulace s velkými daty.
10M	Velké simulace (letectví, automobilová technika, ...).
100M	Velké výzkumné projekty, DNS, vojenské aplikace.

Příklady výpočetních sítí

Strukturovaná čtyřúhelníková
stupňovaná síť (C-type)

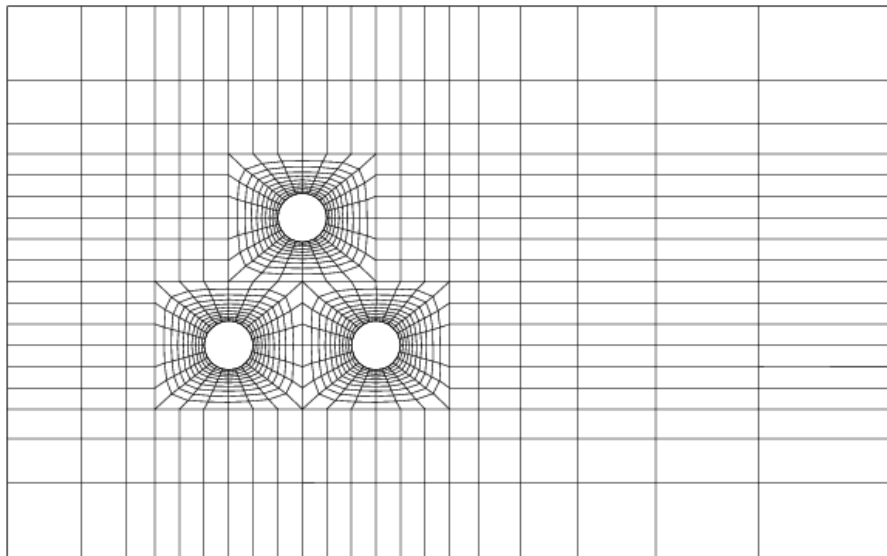


Nestrukturovaná čtyřúhelníková síť

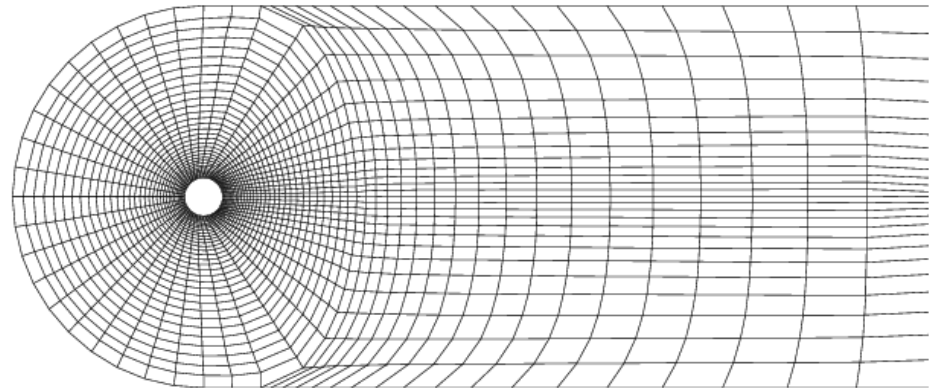


Příklady výpočetních sítí

Blokově strukturovaná čtyřúhelníková
síť se stupňováním

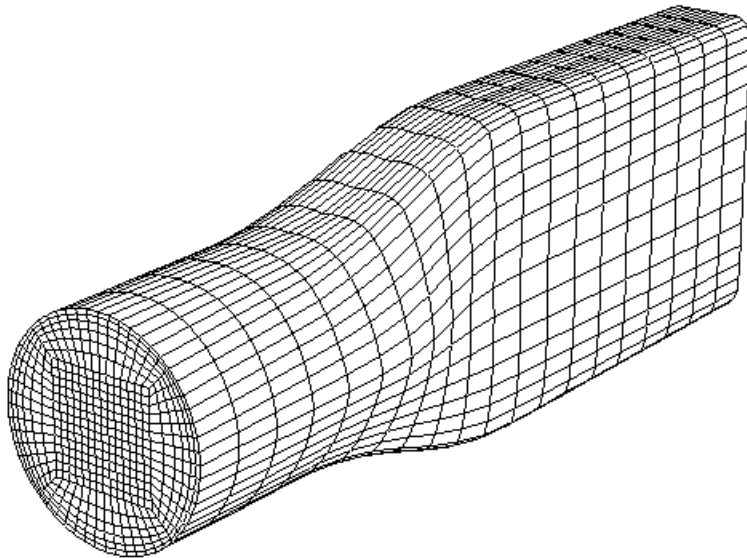


Blokově strukturovaná čtyřúhelníková síť
(O-type)

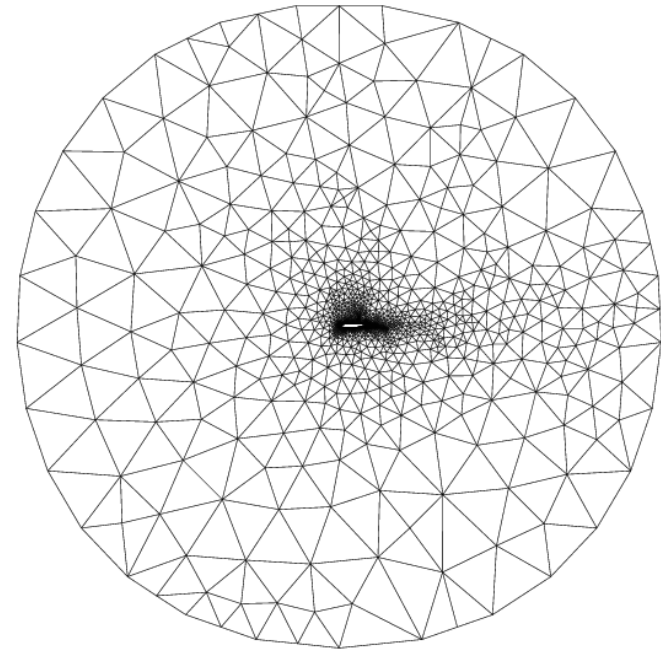


Příklady výpočetních sítí

3D blokově strukturovaná
hexahedrální síť

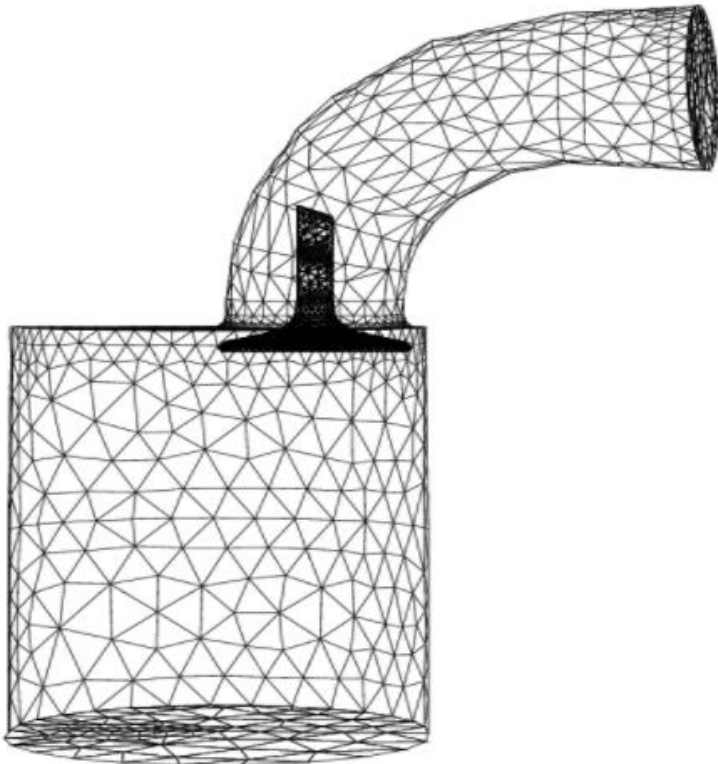


Nestrukturovaná trojúhelníková síť s
lokálním zjemněním pro zachycení mezní
vrstvy

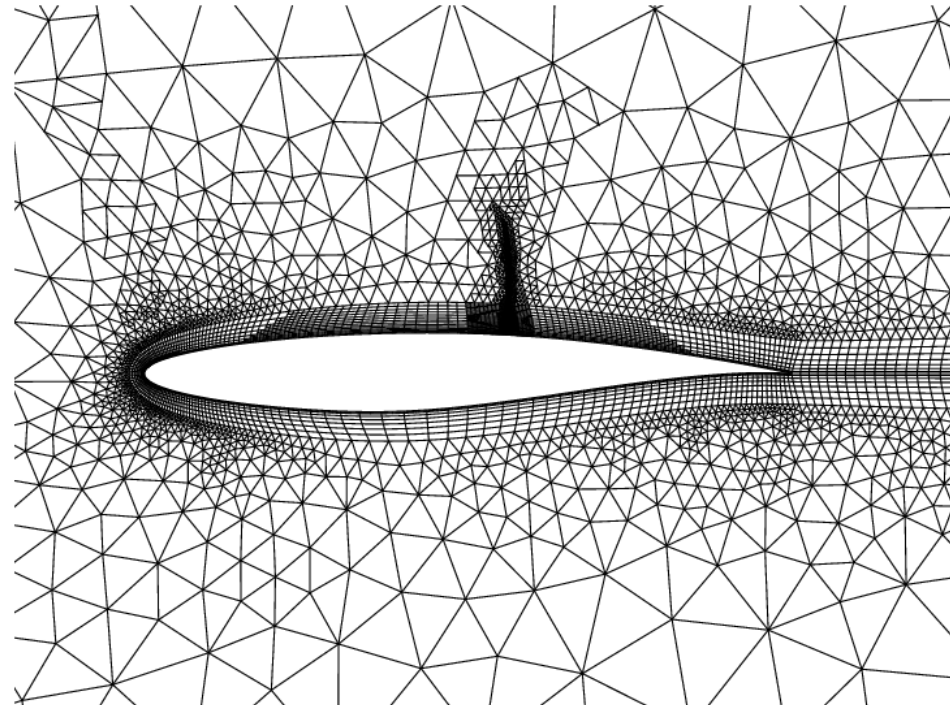


Příklady výpočetních sítí

3D nestruturovaná tetrahedrální síť

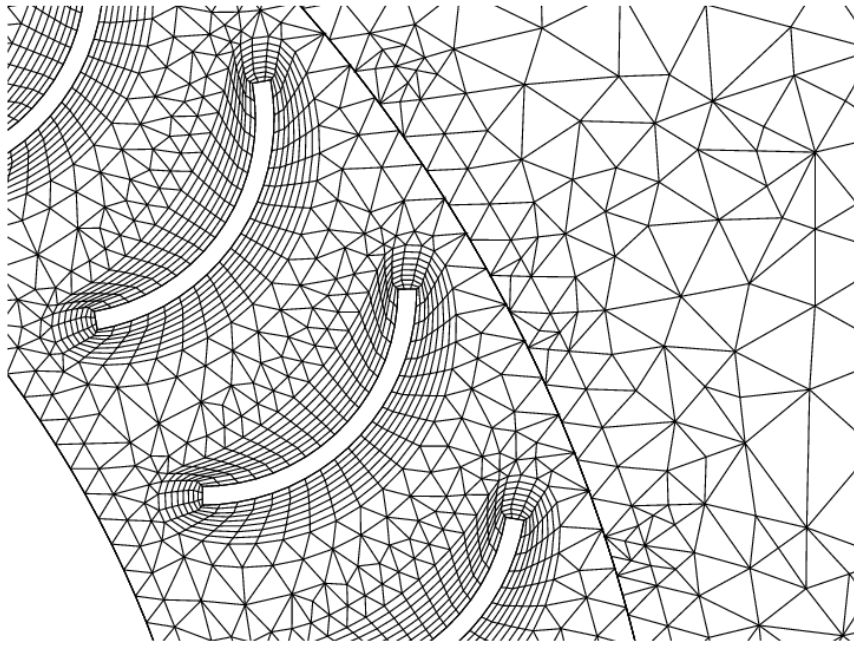


Hybridní trojúhelníková nestruturovaná /
čtyřúhelníková strukturovaná síť,
nekonformní (hanging nodes), lokální
zjemnění

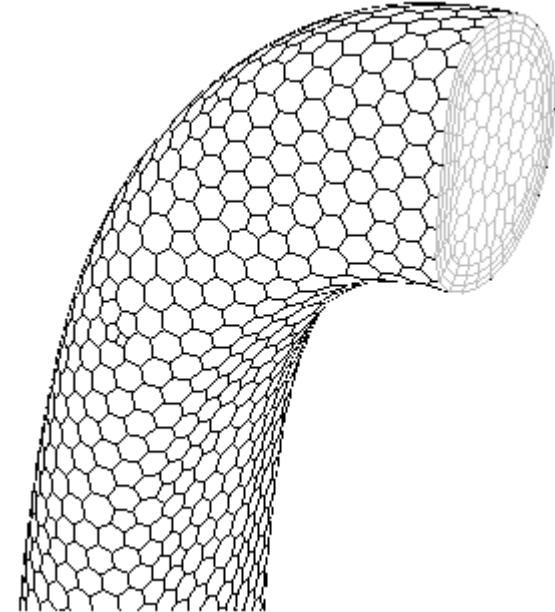


Příklady výpočetních sítí

Hybridní síť s čtyřúhelníkovou strukturovanou částí pro zachycení mezní vrstvy a nestruturovanou trojúhelníkovou částí, nekonformní přechod na rozhraní stator - rotor

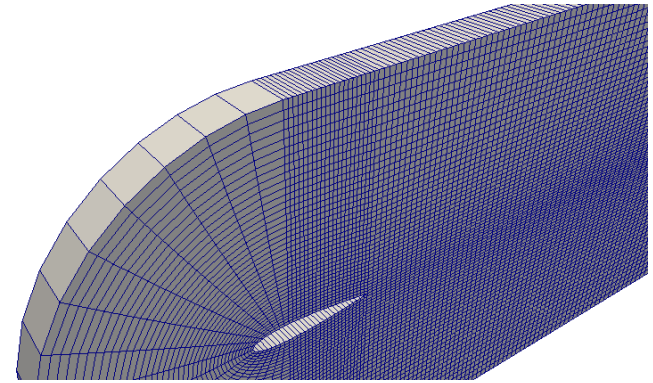


Polyhedrální síť



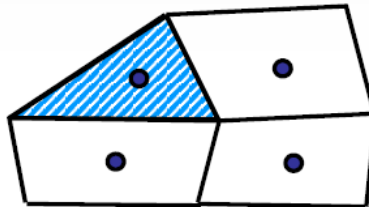
Výpočetní síť v knihovně OpenFOAM

- nestrukturované polyhedrální síť ve 3D
 - 2D a axisymetrické modely: 3D síť s jednou vrstvou elementů
 - strukturované síť: interně uložené stejně jako nestrukturované – souřadnice všech elementů a plná konektivita
- cell-centered schéma – data ukládána v (těžišti) elementu

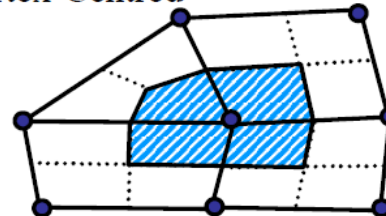


síť pro 2D simulaci v OpenFOAM

Cell-Centred

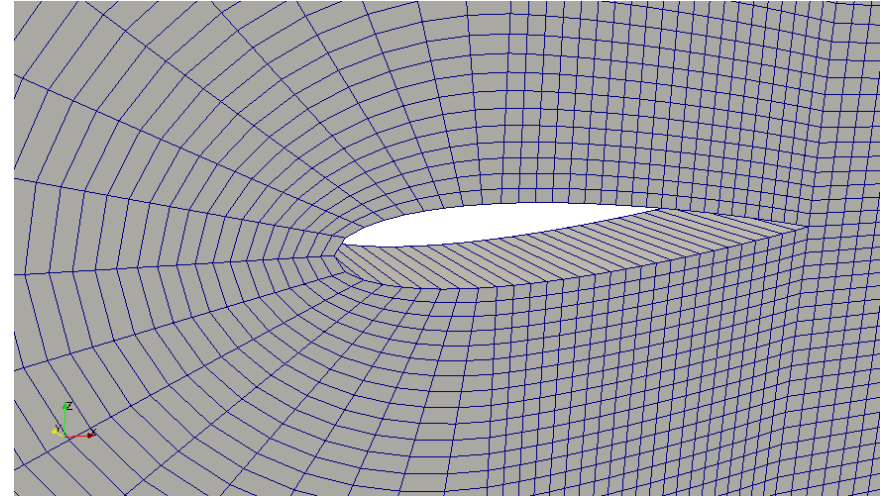


Vertex-Centred

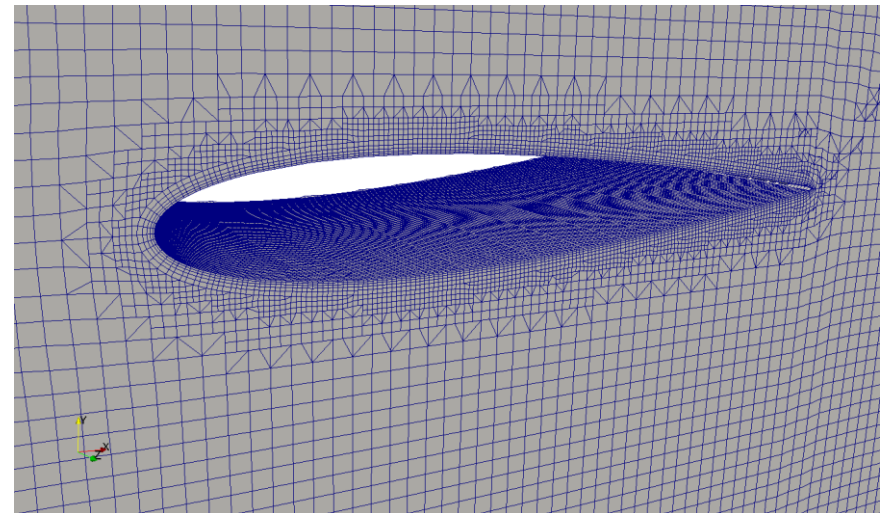


Možnosti výpočetních sítí v OpenFOAM

- blokově strukturované hexahedrální sítě z vlastního generátoru blockMesh
- nestruturované hexa-dominantní polyhedrální sítě adaptované na STL geometrii z vlastního generátoru snappyHexMesh
- sítě importované z externích generátorů
 - fluentMeshToFoam (Fluent .msh)
 - star4ToFoam (STAR-CD .mesh)
 - gambitToFoam (GAMBIT .neu)
 - ansysToFoam (I-DEAS .ans)
 - cfx4ToFoam (CFX .geo)
 - gmshToFoam (gmsh .msh)



síť generovaná pomocí blockMesh



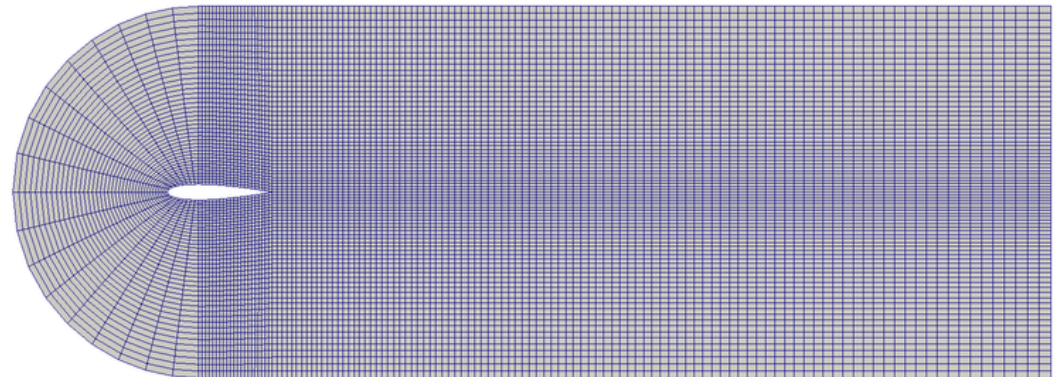
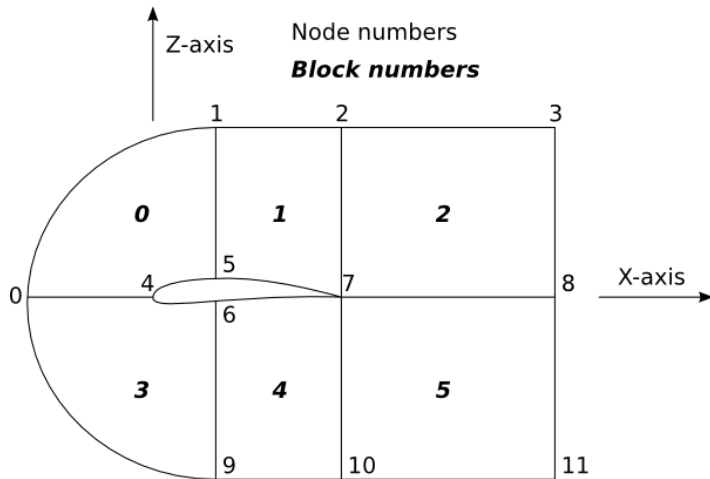
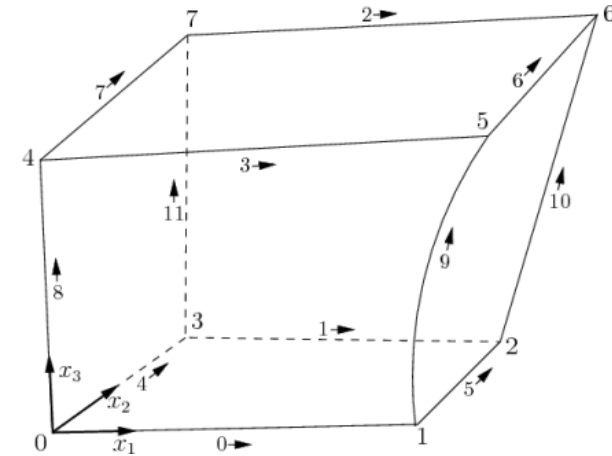
síť generovaná pomocí snappyHexMesh

Blokově strukturované sítě z generátoru blockMesh

Blok: šestistěn definovaný polohou osmi vrcholů s orientací a indexy dle obrázku

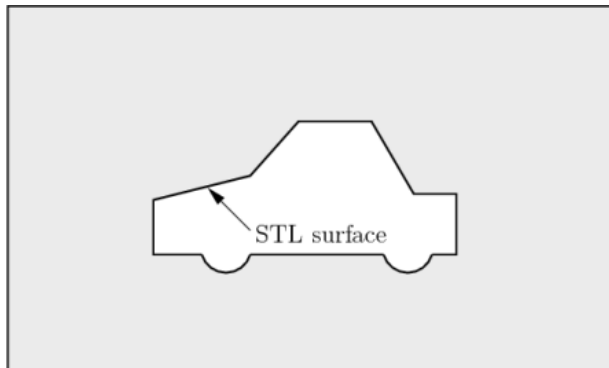
Hrana bloku

- úsečka (line)
- lomená úsečka (polyLine)
- kruhový oblouk (arc)
- spline (spline) nebo B-spline (BSpline)

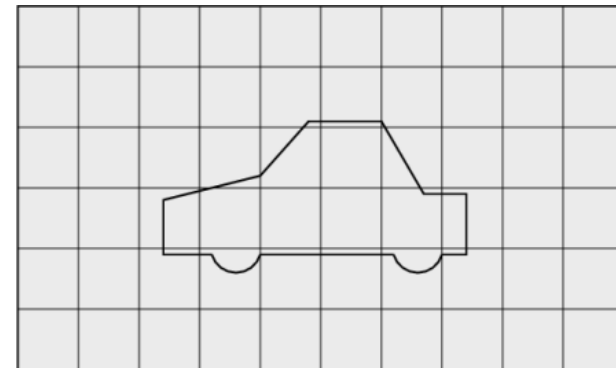


Sítě z generátoru snappyHexMesh (1)

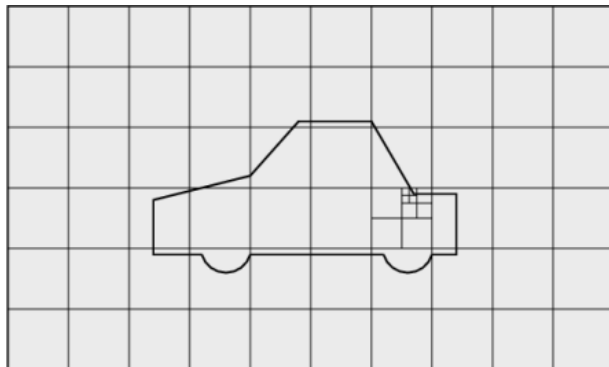
Umožňují zachycení komplexních 3D ploch – geometrie popsaná ve formátu stereolitography (STL) nebo Wavefront Object (OBJ). Zejména pro obtékání geometricky složitých těles.



Vnější a STL geometrie



Základní síť (blockMesh)

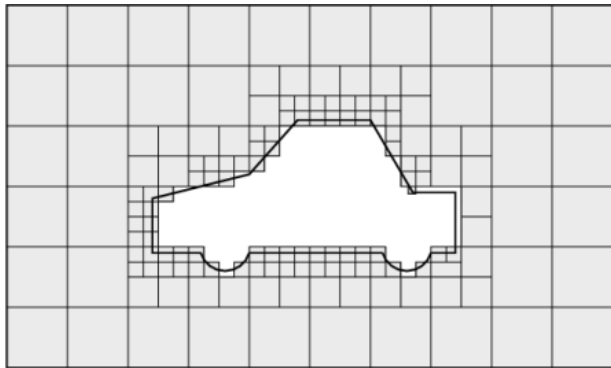


Zjemnění u hran

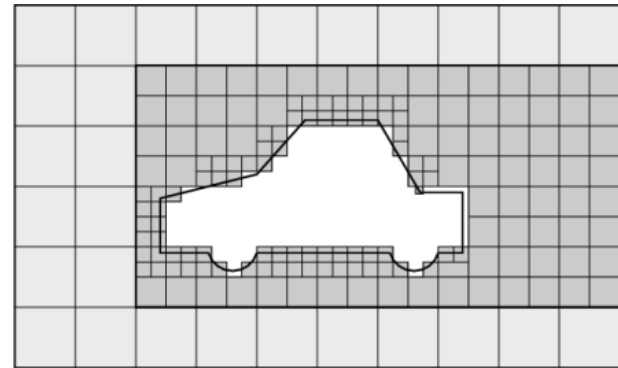


Zjemnění u povrchu

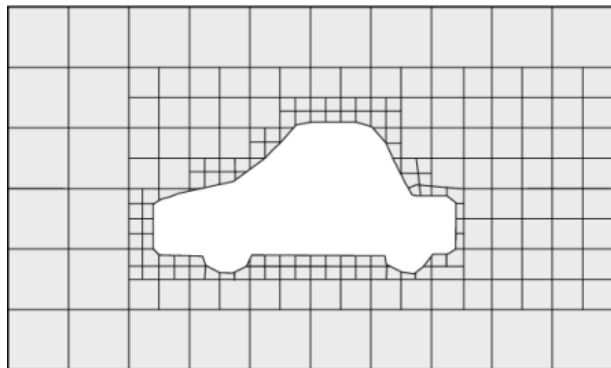
Sítě z generátoru snappyHexMesh (2)



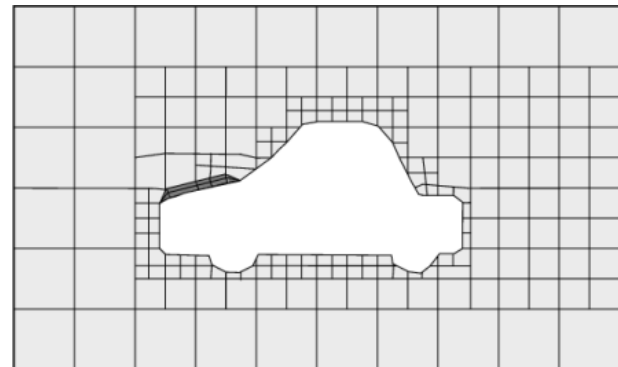
Odstranění elementů uvnitř STL



Zjemnění elementů v podoblasti



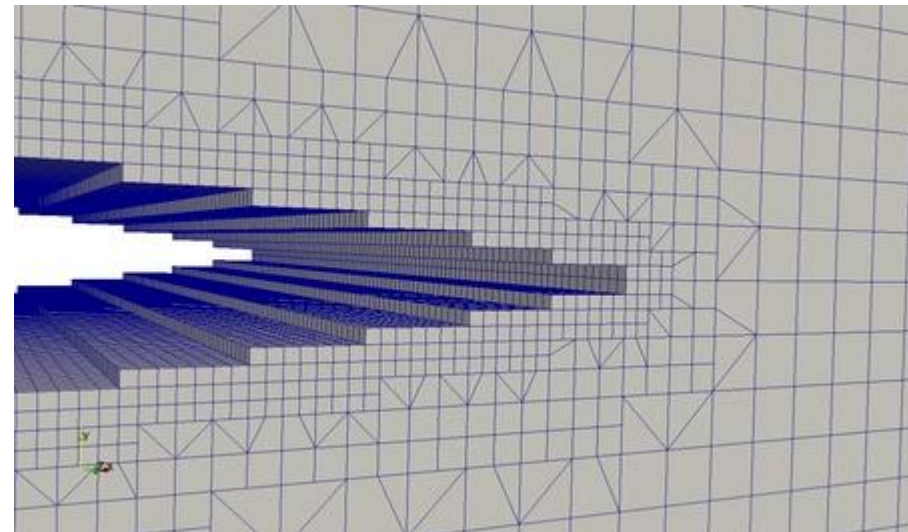
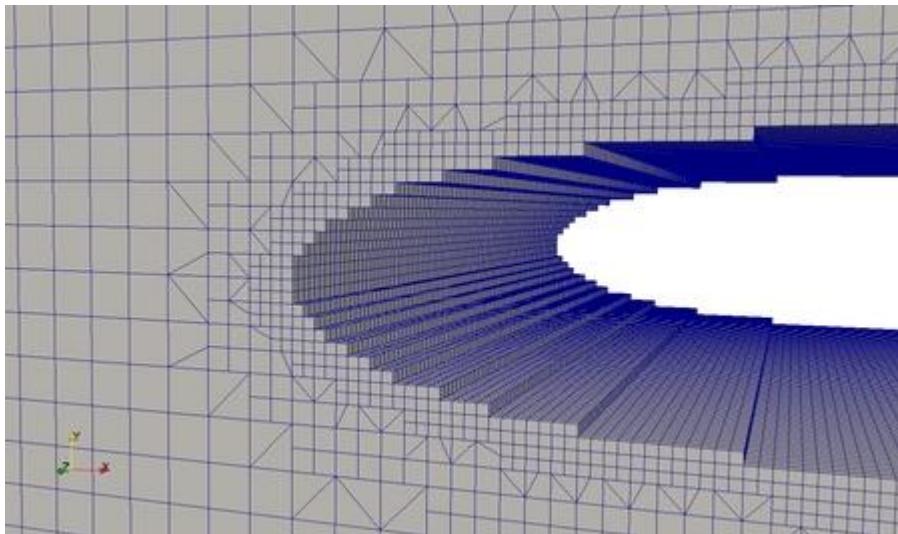
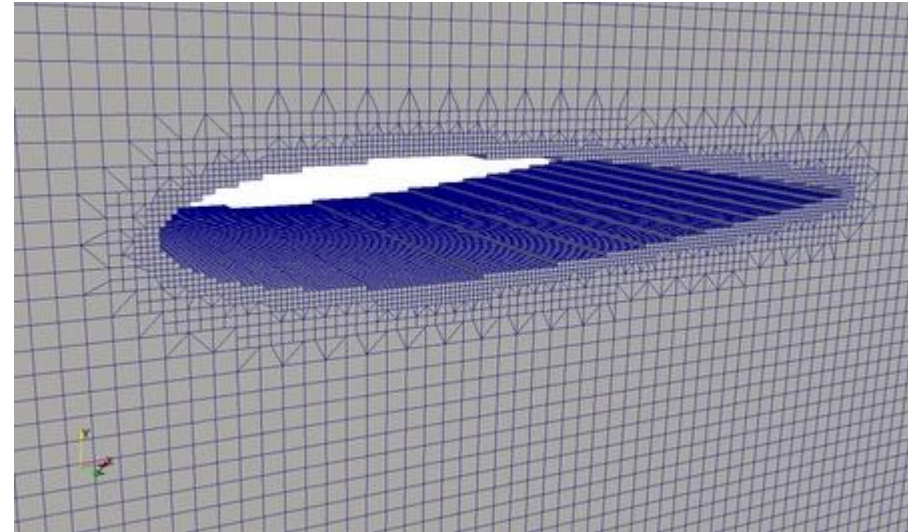
Promítnutí vrcholů na geometrii



Vložení strukturované vrstvy na povrch

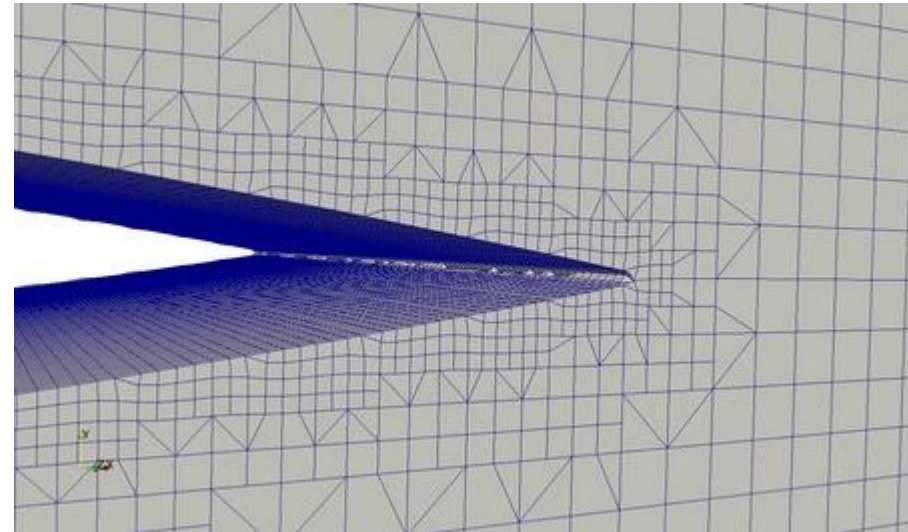
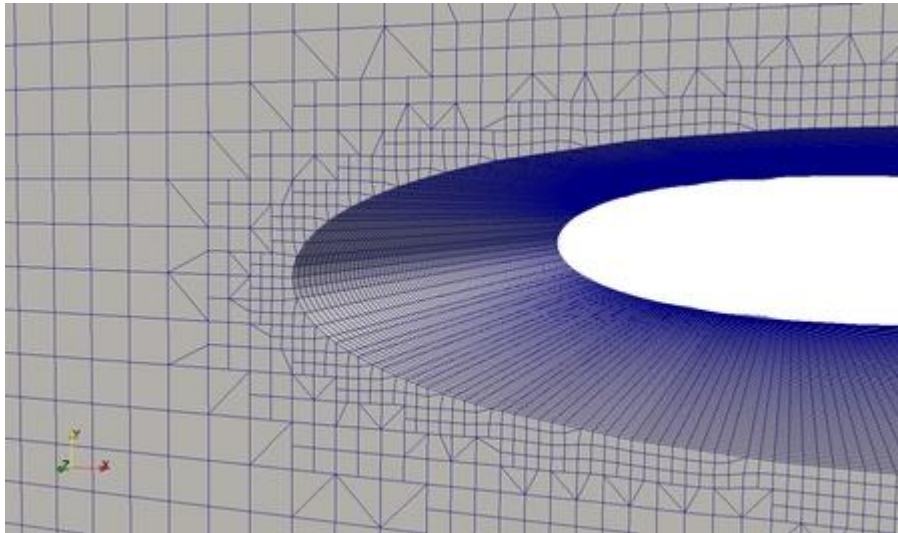
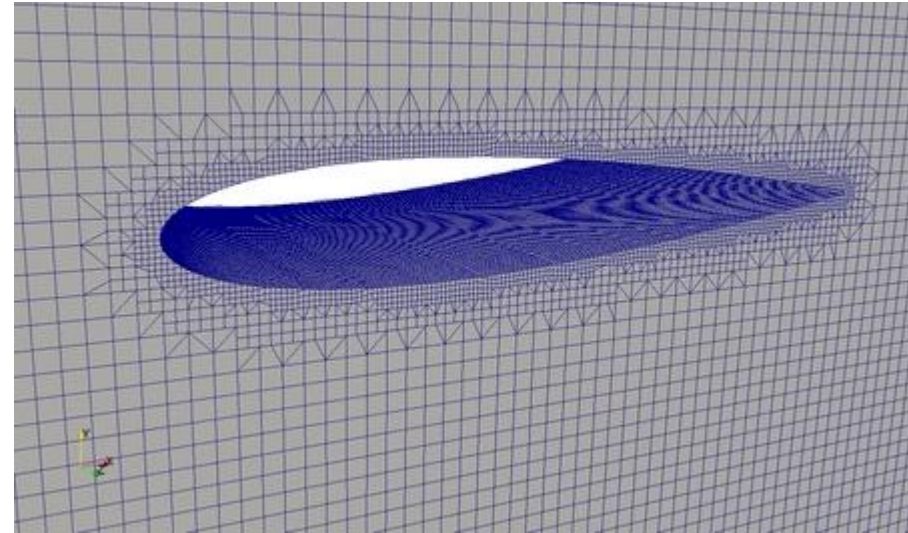
Síťování v snappyHexMesh – problémy

- zachycení ostrých hran na STL geometrii
- zkosené elementy při vnoření vrstev v okolí ostrých hran



Síťování v snappyHexMesh – problémy

- zachycení ostrých hran na STL geometrii
- zkosené elementy při vnoření vrstev v okolí ostrých hran



Síťování v snappyHexMesh – problémy

- zachycení ostrých hran na STL geometrii
- zkosené elementy při vnoření vrstev v okolí ostrých hran

