



**FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI**

**KATEDRA
MECHANIKY**

Diplomová práce

Origami - Architektura a její struktura v moderních konstrukcích

Michaela Abrhámová



FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

KATEDRA
MECHANIKY

Diplomová práce

Origami - Architektura a její struktura v moderních konstrukcích

Bc. Michaela Abrhánová

Vedoucí práce

Ing. Petr Kessler, Ph.D.

© Michaela Abrhánová, 2024.

Všechna práva vyhrazena. Žádná část tohoto dokumentu nesmí být reprodukována ani rozšiřována jakoukoli formou, elektronicky či mechanicky, fotokopírováním, nahráváním nebo jiným způsobem, nebo uložena v systému pro ukládání a vyhledávání informací bez písemného souhlasu držitelů autorských práv.

Citace v seznamu literatury:

ABRHÁMOVÁ, Michaela. *Origami - Architektura a její struktura v moderních konstrukcích*. Plzeň, 2024. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra mechaniky. Vedoucí práce Ing. Petr Kesi, Ph.D.

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta aplikovaných věd
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Michaela ABRHÁMOVÁ**
Osobní číslo: **A22N0145P**
Studijní program: **N0732P260002 Stavební inženýrství – Moderní budovy**
Specializace: **Navrhování a provádění budov**
Téma práce: **Origami – Architektura a její struktura v moderních konstrukcích**
Zadávací katedra: **Katedra mechaniky**

Zásady pro vypracování

Úvodní část s popisem Origami prvků v architektuře a konstrukčních prvcích s použitím vybraných materiálů.

1. Vypracujte textové části dle zadání práce s obecným popisem a rozbořem origami konstrukcí, a to po stránce návrhové tak po stránce konstrukční pro vybraný prvek, s následným určením a jeho použitím.
2. Zpracujte a připravte modely pro experimentální část a některých prvků na testování materiálových charakteristik s únosností řešeného materiálu dle vzorků jako experimentální část práce.
3. Zpracujte a vyhodnoťte testovací vzorky dle únosnosti, jejich vhodnosti či nevhodnosti s určením pevnosti daného materiálu pro používání v konstrukčních systémech.

Rozsah diplomové práce: **úvodní část – 50 – 60 stran A4**
Rozsah grafických prací: **práce skládající se ze schémat a textových částí a z exp. části**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

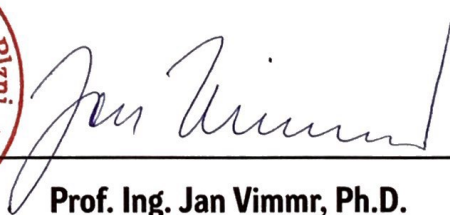
1. ČSN EN 1990 – Zásady navrhování stavebních konstrukcí
2. ČSN EN 1991 – Zatížení stavebních konstrukcí
3. ČSN EN 1993 – Navrhování ocelových konstrukcí
4. Navrhování kompozitních konstrukcí. ČKAIT 2009
5. Frick / Knoll – Stavební konstrukce I. a II. JAGA 2005

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kesi, Ph.D.**
Katedra mechaniky

Datum zadání diplomové práce: **11. října 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **31. května 2024**



Doc. Ing. Miloš Železný, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Jan Vimmr, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 11. října 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů. Tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Západočeská univerzita v Plzni má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Plzni dne 31. května 2024

.....
Michaela Abrahámová

V textu jsou použity názvy produktů, technologií, služeb, aplikací, společností apod., které mohou být ochrannými známkami nebo registrovanými ochrannými známkami příslušných vlastníků.

Abstrakt

Tato diplomová práce zkoumá aplikaci principů origami v moderní architektuře, čímž objasňuje problematiku geometrických a strukturálních konceptů v konstrukcích. Teoretická část se soustředí na vysvětlení této problematiky na reálných příkladech z praxe, kdy je věnována pozornost zejména diskretizaci ploch organických tvarů a s tím souvisejícímu použití materiálů a technologií. Praktická část se zaměřuje na návrh, výrobu a testování modelu fasádního panelu, jehož únosnost byla experimentálně ověřena a porovnána s výsledky softwarových simulací. V této části je ověřována spolehlivost simulací včetně celkového chování modelu. Také je řešena vhodnost užití těchto panelů v praxi.

Abstract

This thesis explores the application of origami principles in modern architecture, thus clarifying the issue of geometric and structural concepts in structures. The theoretical part focuses on the explanation of this issue through real examples from practice, where attention is paid in particular to the discretization of surfaces of organic shapes and the related use of materials and technologies. The practical part focuses on the design, fabrication and testing of a facade panel model whose load-bearing capacity has been experimentally verified and compared with the results of software simulations. In this part, the reliability of the simulations including the overall behaviour of the model is verified. The suitability of using these panels in practice is also addressed.

Klíčová slova

origami • současná architektura • geometrie • diskretizace • fasádní panel

Poděkování

Na tomto místě bych velice ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Petru Keslovi, Ph.D., za vstřícnost a ochotu věnovat se nevšednímu tématu mé diplomové práce, za čas, který mi věnoval při konzultacích i v laboratoři, a za všechny jeho odborné rady. Mé velké poděkování patří i panu Ing. Janu Krystkovi, Ph.D., za odbornou pomoc a za jeho čas věnovaný provádění experimentu v laboratoři.

Také bych chtěla poděkovat panu doc. RNDr. Janu Vrškovi, Ph.D., z katedry matematiky za pomoc při výběru tématu s přesahem do problematiky geometrie konstrukcí a za poskytnutí odborné literatury.

Dále děkuji také své rodině a přátelům, kteří mě během celého studia zde na Západočeské univerzitě podporovali.

Obsah

1	Úvod	3
2	Teoretická část	5
2.1	Origami	5
2.1.1	Historie origami	5
2.1.2	Základní principy geometrie origami	7
2.1.3	Využití origami	11
2.1.4	Curved-crease origami	14
2.2	Strukturální aspekty současné architektury	17
2.2.1	Geometrie v současné architektuře	17
2.2.2	Organické vs. geometrické formy	19
2.2.3	Rozvinutelné plochy a jejich užití v architektuře	23
2.3	Diskrétní reprezentace ploch v architektonické geometrii	29
2.3.1	Sítě	31
2.3.2	Využití generativního navrhování	35
2.4	Fasádní panely	38
2.4.1	Klasifikace fasádních panelů	38
2.4.2	Inteligentní fasádní systémy	39
2.4.3	Výrobní technologie zakřivených fasádních panelů	40
2.4.4	Vybrané realizace fasád	43
3	Praktická část	49
3.1	Podoba panelu	49
3.1.1	Podkladové dokumenty	49
3.1.2	Materiálové řešení	50
3.1.3	Geometrie	51
3.1.4	Výroba	52
3.2	Zkoušení únosnosti panelu	53
3.2.1	Statický software	53
3.2.2	Laboratoř	55

3.2.3	Vyhodnocení výsledků	61
4	Závěr	65
	Bibliografie	67
	Seznam obrázků	75
	Seznam tabulek	79
5	Přílohová část	81

Origami, umění skládání papíru, představuje fascinující spojení tradice a inovace. Jeho principy byly po staletí využívány především jako forma uměleckého vyjádření a meditace, v posledních desetiletích se však nově objevené techniky a principy origami staly inspirací nejen pro architektonické návrhy.

Tato diplomová práce se nesoustředí pouze na origami, ale využívá ho jako médium pro hlubší pochopení a aplikaci geometrických principů v konstrukcích moderní architektury. Origami zde umožňuje prozkoumat základní geometrické a strukturální koncepty, které jsou následně aplikovatelné na širokou škálu architektonických řešení. Koncept origami je v této práci výchozím bodem pro širší zkoumání struktur v architektuře.

Práce je rozdělena do dvou hlavních částí – teoretické a praktické. Teoretická část se zabývá historií a základními principy origami, jeho využitím v různých oborech a konkrétně pak fenoménem curved-crease origami. Dále jsou řešeny strukturální aspekty současné architektury, kde jsou zkoumány geometrické a organické formy a také rozvinutelné plochy a stavby, které rozvinutelnost ploch využívají. Pozornost je pak věnována zejména diskrétní reprezentaci ploch a přechodem k praktické části je rešerše v oblasti fasádních panelů včetně vybraných realizací fasád některých velkých projektů. Důraz je přitom kladen na atypické, organické fasády.

Praktická část je soustředěna na konkrétní konstrukci fasádního panelu. Je zde popisován proces navrhování, geometrie, materiálové řešení a výroba. Součástí je také testování únosnosti panelu na modelu vytvořeném na základě modelové podobnosti. Tato část práce zahrnuje jak statické výpočty provedené v softwaru, tak experimentální zkoušky v laboratoři, které ověřují softwarově vypočtené předpoklady a přinášejí praktické poznatky pro další vývoj.

Cílem této diplomové práce je analyzovat současné stavby z návrhového i konstrukčního hlediska, zaměřit se na atypické tvary, kterými tyto stavby disponují, a provést rozbor aplikovaných řešení. Dílčím cílem je inspirovat se v současné architektuře při výběru panelu pro praktickou část práce a také provést rešerši v oblasti fasádních panelů, v oblasti jejich výroby a realizace fasád. Cílem praktické části je ověřit únosnost panelu pomocí softwarové simulace a tyto hodnoty následně ověřit

experimentálním měřením v laboratoři na připravených modelech fasádního panelu a vyhodnotit vhodnost užití panelu v konstrukcích pozemního stavitelství.

Motivací pro tuto práci je zdůraznění významu geometrie při navrhování moderních staveb. V práci je usilováno o nalezení kompromisu mezi užitím hladkých ploch a ploch diskretizovaných, přičemž je myšleno na optimalizaci nákladů. Podnětem pro provedení experimentu v praktické části práce je zájem o obdržení výsledků zkoušení modelů s nerovinnými, rozvinutelnými plochami a posouzení jejich shody s výsledky softwarových výpočtů.

Teoretická část

2

2.1 Origami

Metodika origami se výrazně liší od většiny ostatních procesů tvorby. Skulptura (ze dřeva, kamene, ledu nebo skla) je subtraktivní: materiál je odstraněn, aby se odhalila konečná podoba. Stavba (z písku, hlíny, kovu, dřeva, skla) je aditivní: materiály se spojují, aby se vytvořil finální produkt. Jednolistové origami je metamorfni: nic se neodebírání ani nepřidává. [1]

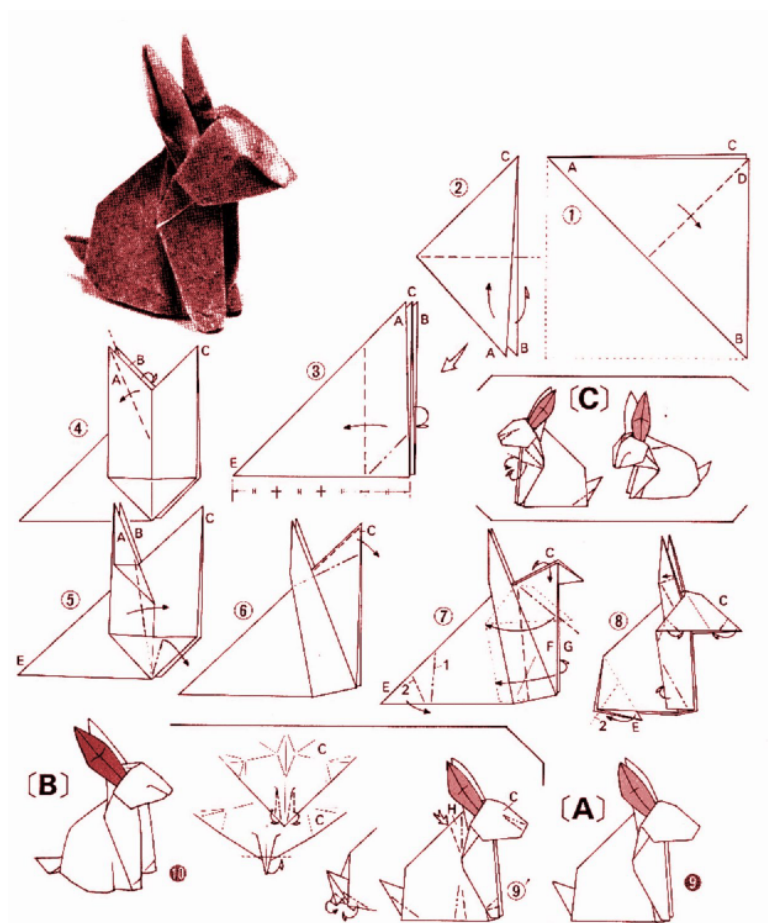
Termín origami vznikl spojením dvou japonských slov: **ori** neboli skládat a **kami** - papír. Tento pojem je tedy samovysvětlující a doslova znamená skládat papír. Jedná se o vytváření papírových modelů, které mohou znázorňovat nejrůznější tvary, od jednoduchých květů přes zvířata až po složité autoportréty samotných umělců. [2] Existuje nespočet knih plných rozličných motivů, doplněných o podrobné návody, podle kterých lze samotné origami skládat (viz obr. 2.1 na str. 6).

2.1.1 Historie origami

O historii origami se vedou diskuse. Na rozdíl od jiných uměleckých forem, origami modely z papíru rychle degradují a nezůstává po nich žádné náčiní či artefakty, které by naznačovaly, kde origami vzniklo a kdo ho poprvé vynalezl.

Historici uvádějí, že poprvé byl papír vynalezen v Číně Cchaj Lunem v roce 105 n. l. Archeologické nálezy však naznačují, že papír vynalezli ještě dříve, a je pravděpodobné, že od té doby, co papír existuje, se ho lidé pokoušejí skládat. Neexistují o tom žádné důkazy, ale lze předpokládat, že i skládání papíru začalo v Číně. Nejstarším takovým příkladem je pak zajisté yuanbao. Jedná se o papír složený tak, aby vypadal jako zlaté nugety, které se při ceremoniálech spalují jako oběť zemřelým. Není jasné, kdy tato tradice vznikla, pokračuje však dodnes. [2]

Nejstarším jednoznačným dokladem o origami je krátká báseň, kterou složil Ihara Saikaku v roce 1680. Stojí v ní: *Rosei-ga yume-no cho-wa orisue*. (Motýlí v Roseině snu by byli origami.) Zde označil model origami nazvaný *mecho* a *ocho* (motýlí



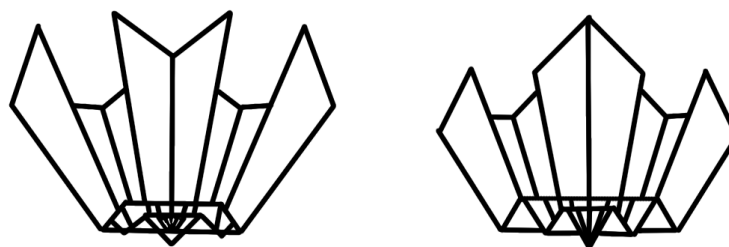
Obrázek 2.1: Příklad návodu ke složení origami [3]

samec a samice) jako *orisue*. Tyto modely, jejichž nákres lze vidět na obr. 2.2 na str. 7, jsou používány k dekoraci lahví saké¹ zejména při svatebních obřadech. [4]

Origami se tedy stereotypně přiřazuje Japonsku. Japonci si své vzory předávali ústní tradicí, kdy se předávaly z matky na dceru a protože dříve nebylo zvykem vše zapisovat, zachovaly se jen ty nejjednodušší motivy. První písemný návod se tak objevil až v roce 1797, kdy bylo vydáno dílo Senbazuru Orikata (Skládání tisíce jeřábů).

Skládání papíru se paralelně rozvíjelo také ve Španělsku. Tajemství skládání papíru se tam dostalo ve 12. století z arabského světa, kde bylo známo již od 8. století. Arabům jejich náboženství zakazovalo vytvářet reprezentativní figury, místo toho pro ně bylo origami nástrojem pro studování geometrie. Poté, co Arabové opustili Španělsko, Španělé překročili rámec geometrických vzorů a vyvinuli papiroflexii, což je dnes ve španělsky mluvících zemích jen jiným názvem pro origami.

¹tradiční japonské víno

Obrázek 2.2: Nákres origami *mecho* a *ocho* [Autorka]

Zatímco v tradičním origami se skládací sekvence a názvy předávají z generace na generaci, ale nikoliv jako něco, co vymyslela konkrétní osoba, moderní origami vychází ze zcela jiného paradigmatu. Skládací sekvence moderních origami jsou dnes považovány za *modely designované tvůrci origami*. Moderní origami vděčí za mnohé úsilí umělci Akira Yoshizawovi. Po staletích, kdy lidé skládali stále stejné opakující se tradiční vzory, začal mistr Yoshizawa vydávat od počátku 50. let 20. století knihy se zcela novými, jím osobně navrhovanými modely.

Yoshizawa spolu se Samem Randlettem také vytvořil standardní sadu symbolů pro origami diagramy, která se používá dodnes. Výstavy jeho prací v Japonsku i po celém světě seznámily s origami mnoho lidí, což vedlo ke vzniku různých asociací, včetně Origami Center of America (nyní OrigamiUSA) a British Origami Society. Sám také vyvinul techniku známou jako backcoating, která spočívá v kaširování dvou vrstev washi², čímž se vytvoří papír s velmi vhodnými vlastnostmi pro skládání. [6]

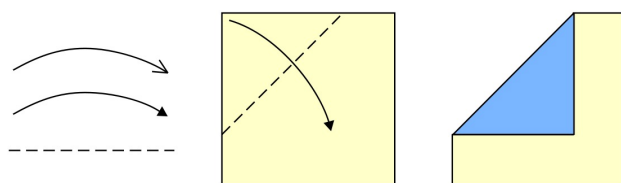
2.1.2 Základní principy geometrie origami

I když na první pohled může origami vypadat pouze jako precizní překládání papíru za účelem složení modelu požadovaného tvaru, skrývá se za tímto termínem ve skutečnosti mnohem víc. Origami má celý svůj diagramový systém se symboly pro jednotlivé přehyby a operace, který je obecně uznávaný a jsou pomocí něj zpracovávány všechny návody a knihy zabývající se touto tematikou. Formulován je také soubor axiomů, který popisuje origami geometrii a doplňuje tak klasickou geometrii konstrukční (rýsování pomocí pravítka a kružítko).

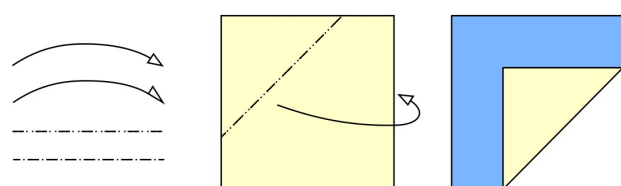
²Tradiční japonský papír zpracováváný ručně s použitím vláken z vnitřní kůry stromu gampi, keře mitsumata nebo keře moruše papírové.[5]

2.1.2.1 Yoshizawa-Randlett systém

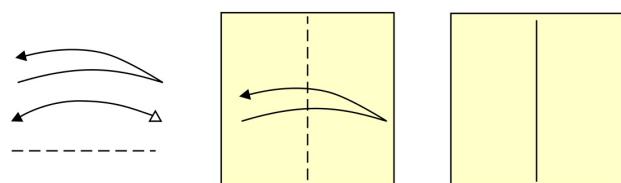
Yoshizawa-Randlett systém je soubor celosvětově uznávaných symbolů, které se používají při zapisování návodů návrhů origami. Symboly jsou rozdělené na ty označující základní přehyby a na ty označující základní operace. Origamista je pak se znalostí tohoto systému schopen řídit se jakýmkoliv návodem napsaným jazykem těchto symbolů. Takovému návodu se říká diagram origami.[7] Na obrázcích 2.3 až 2.5 jsou uvedeny některé základní symboly pro přehyby a na obrázcích 2.6 až 2.8 jsou znázorněny symboly některých běžných operací. Příkladem diagramu vycházejícího z tohoto systému je návod na obrázku 2.9 na str. 10 pro vytvoření papírového jeřába - *orizuru*.



Obrázek 2.3: Symbol přehybu *valley* [8]



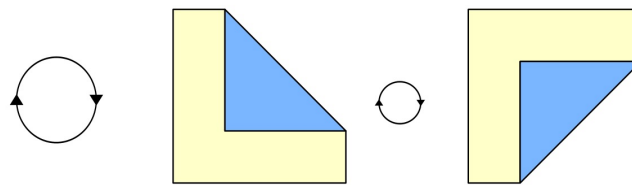
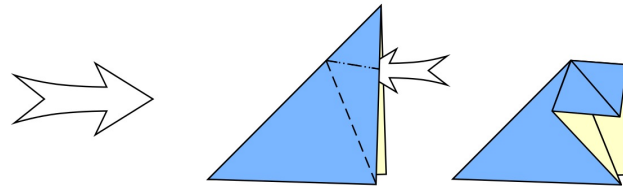
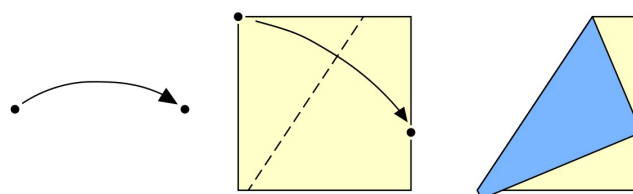
Obrázek 2.4: Symbol přehybu *mountain* [8]



Obrázek 2.5: Symbol zpětného přehybu *valley* [8]

2.1.2.2 Axiomy

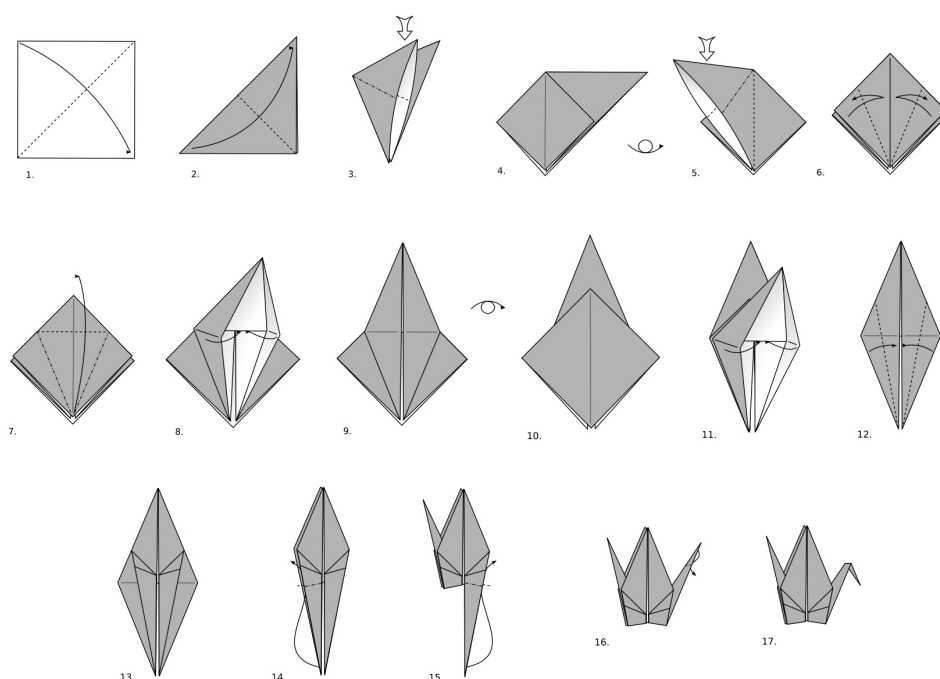
Axiom je tvrzení, které není třeba dokazovat, jelikož se předem pokládá za platné. Na axiomech jsou obvykle založené matematické teorie. A obdobně jako existují

Obrázek 2.6: Symbol *rotace* [8]Obrázek 2.7: Symbol *otevření* [8]Obrázek 2.8: Symbol *spojení bodů* [8]

axiomy pro rovinnou geometrii, byla vytvořena sada axiomů pro popis geometrie origami. [10] Na vytvoření těchto axiomů se podíleli moderní matematici Jacques Justin, Humiaki Huzita a Koshiro Hatori. Prvních šest axiomů objevil Justin v roce 1989, v roce 1991 je pak znovu objevil a oficiálně uvedl Huzita. Sedmý byl v roce 2001 odhalen Hatorim, ale zpětně se ukázalo, že v původním Justinově článku byl již obsažen také. Tyto axiomy se tedy označují jako Huzita-Justinovy popř. Huzita-Hatoriho axiomy.

Nehledě na název, tyto axiomy formálně popisují ty geometrické konstrukce, které lze pomocí origami provést. [11] Jedná se o sedm různých způsobů, jak lze vytvořit jeden záhyb zarovnáním jedné nebo více kombinací bodů a čar (tj. již existujících záhybů) na listu papíru. Prvních šest axiomů umožňuje řešit všechny kvadratické, kubické a kvartické rovnice s racionálními koeficienty tak, že na kusu papíru nastavíme jednotkovou délku a pak skládáním najdeme kořeny polynomů. Nejzásadnějším faktem ale je, že pomocí těchto axiomů lze zkonstruovat dva ze tří antických problémů - trisekci úhlu a zdvojení krychle. [12]

Všech sedm axiomů níže bylo sepsáno americkým fyzikem a slavným origamis-



Obrázek 2.9: Origami diagram *orizuru* [9]

tou Robertem Jamesem Langem poté, co se mu povedlo dokázat, že tento seznam je již definitivní a žádné nové axiomy nezůstávají neobjeveny.³ [11]

1. Jsou-li dány dva body A a B , můžeme vytvořit přehyb, který jimi prochází.
2. Jsou-li dány dva body A a B , můžeme vytvořit přehyb tak, že se bod A přemístí na bod B .
3. Jsou-li dány dvě přímky p a q , můžeme vytvořit přehyb tak, aby p ležela na q .
4. Je-li dán bod A a přímka p , můžeme vytvořit přehyb kolmý k přímce p a procházející bodem A .
5. Jsou-li dány dva body A a B a přímka p , můžeme vytvořit přehyb tak, aby bod A ležel na p a zároveň procházel bodem B .
6. Jsou-li dány dva body A a B a dvě přímky p a q , pak můžeme vytvořit přehyb tak, aby bod A ležel na p a bod B ležel na q .
7. Je-li dán bod A a dvě přímky p a q , můžeme vytvořit přehyb kolmý k přímce q tak, aby bod A ležel na p .

³Autorka pro přesnost matematické terminologie vychází z českého překladu uvedeného v diplomové práci Jany Boháčové. [13]

2.1.3 Využití origami

Objevení sedmi axiomů, z nichž každý definoval jednu metodu skládání, umožnilo využít plný potenciál origami. Origamisté, kteří byli zároveň odborníky v různých oborech, začali implementovat tuto metodiku do svých vlastních výzkumů a prací. S některými výrobky, které origami využívají se můžeme setkat denně. Příkladem je airbag v automobilech. Látka musí být v malém prostoru poskládána tak, aby se při nárazu mohla díky prudké expanzi plynu rychle a zcela rozvinout a nedošlo k selhání airbagu.

Mnohé vědecké aplikace však vyžadují propracovanější řešení a každý ušetřený prostor navíc je velmi cenný. V této kapitole budou ukázána vybraná odvětví s konkrétními příklady využití v reálném životě a především ve vědě.

2.1.3.1 Biomedicínské inženýrství

Jedním z omezení, na která narážejí konvenční biomedicínská zařízení, je to, že jejich struktury jsou dvoudimenzionální, zatímco většina biosystémů má 3D strukturu, což může vést ke značným komplikacím. Aplikace založená na origami, která se uplatňuje např. u tkáňových scaffoldů⁴, spočívá ve změně tvaru ze složené dvou- rozměrné struktury na trojrozměrnou po vystavení jedinečným podnětům.

Origami biomedicíne nabízí možnost snadné změny tvaru z 2D na 3D. Jedním z příkladů je použití v podobě gastrointestinálního mikrochirurgického robota. Jeho velikost pomáhá zajišťovat neinvazivnost zákroku při operaci tím, že se při vstupu zmenší (složí) do kompaktní podoby.

Dalším příkladem je tzv. buněčné origami neboli 3D mikrostruktury s buňkami. Lze je vyvinout v oblasti scaffoldů pro umělé tkáně. Proces tvarové změny, které se dosahuje vnějším signálem s využitím chemických, elektrických nebo teplotních iniciátorů, je zde výhodný především pro vkládání struktury do těla a cestování po něm.

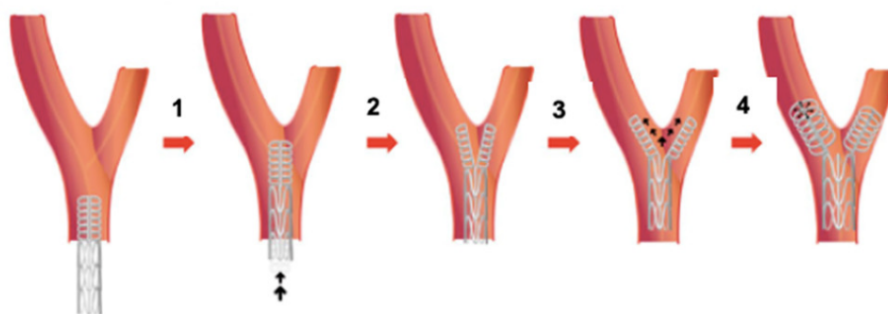
Stejného procesu se využívá i u problematiky umístování katetrů a stenů, postup je znázorněn na obr. 2.10 na str. 12. [14]

2.1.3.2 Kosmické inženýrství

Možnost složit nějaký objekt tak, aby měl několikanásobně menší rozměry než po rozložení, není žádaná pouze v medicíně. Velmi důležitá je také např. v dopravě. A o to důležitější, pokud se jedná o dopravu různých zařízení do vesmíru.

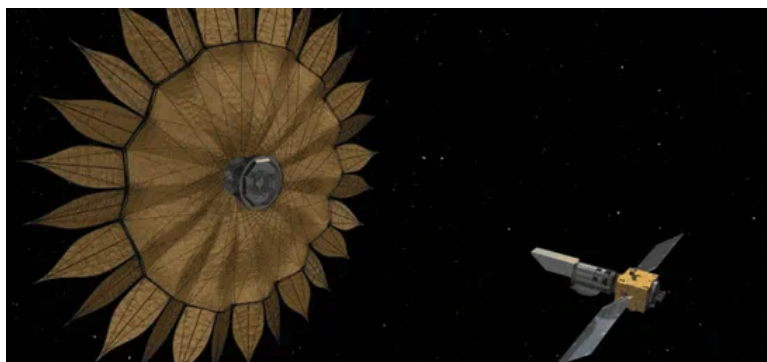
Inženýři v oblasti vesmírného výzkumu se neustále potýkají s výzvami spojenými se záznamem exoplanet. Hvězdy, kolem kterých tyto planety obíhají, vyzařují

⁴Materiál sloužící jako podklad při tvorbě nových funkčních tkání. Je důležitou složkou tkáňového inženýrství.



Obrázek 2.10: Rozložení stenu po zavedení do cévy [14]

obrovské množství světla, což značně ztěžuje pozorování. Proto v laboratoři Jet Propulsion vyvinuli obří stínidlo ve tvaru květiny, které má být použito s vesmírnými teleskopy. Toto stínidlo se před startem složí a poté ve vesmíru rozvine, aby se umístilo před obíhající teleskop a blokovalo tak světlo hvězd, čímž umožní detailní pozorování exoplanet. Tento design (obr. 2.11 na str. 12) vychází z principu origami známého jako *flasher* (obr. 2.12 na str. 13), který umožňuje, aby se velký list složil do těsně zabaleného válce.[15]

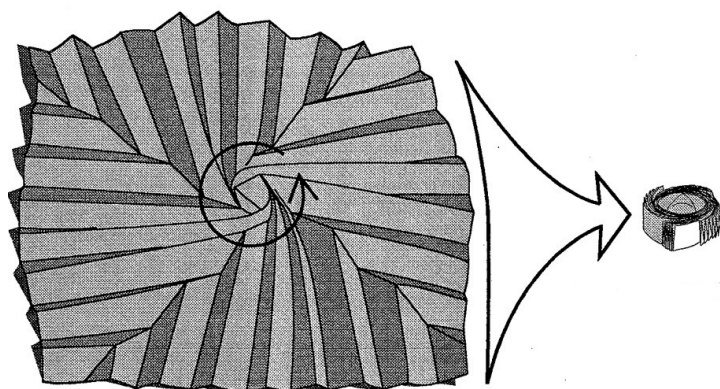


Obrázek 2.11: Design stínidla [15]

2.1.3.3 Architektura

Na rozdíl od předchozích příkladů, architektura inspirovaná origami se zpravidla soustředí pouze na jeho estetickou stránku, nikoliv na funkčnost. Budovy vycházející z origami struktur jsou inspirované tvary jednotlivých modelů, ale princip skládání již často neberou v potaz a konstrukce je vyrobená tradičně.

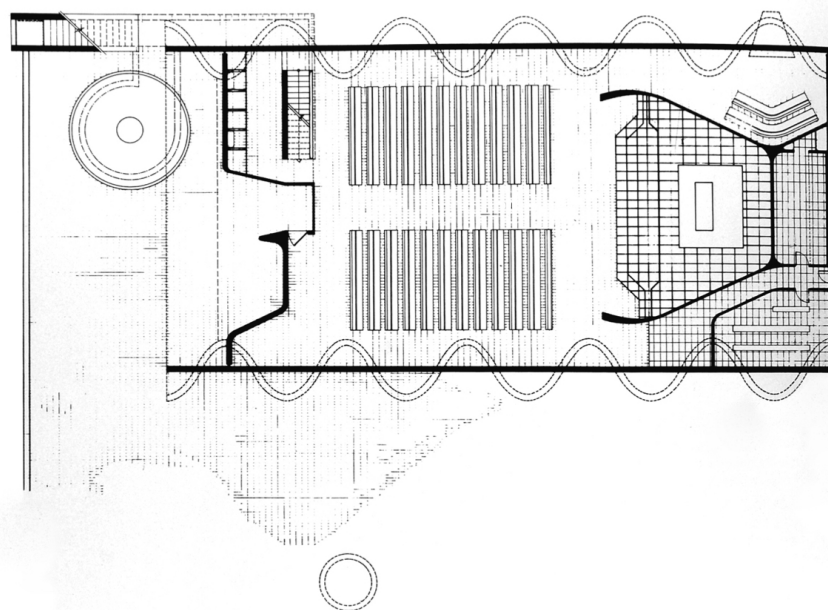
Jako příklad poslouží kostel v Uruguayském městě Atlántida, známý jako *Iglesia de Estación Atlántida* (na obr. 2.13 na str. 13) od architekta Eladia Dieste. Dvě paralelní obvodové stěny hlavní lodi jsou tvořeny režným zdivem, jehož první řada tvoří

Obrázek 2.12: Origami *flasher* [16]

přímku, v rovině střechy má však tvar připomínající sinusoidu (lze vidět na obr. 2.14 znázorňující půdorys stavby a na obr. 2.15 z průběhu výstavby). Stěny jsou vyztuženy ocelovými dráty a spolu se střechou dohromady tvoří dvojitou zakřivenou skořepinu, která spočívá na betonových pilotách. [17]

Obrázek 2.13: Kostel *Iglesia de Estación Atlántida* [18]

Oproti tomu lze ale najít i konstrukce, které využívají úplný potenciál origami - tedy spojení výjimečnosti tvarů a zároveň možnosti skládání. Těmi jsou například stínící clony navržené na katedře architektury na univerzitě v Oregonu [19], které jsou vyvinuty tak, aby během letních měsíců odrážely co nejvíce světla a zároveň propustily dostatečné množství během zimy. Design clon byl navíc inspirován sochami Erwina Hauera a jeho hrou se světlem. (obr. 2.16 na str. 15)



Obrázek 2.14: Půdorys kostela *Iglesia de Estación Atlántida* [18]

2.1.4 Curved-crease origami

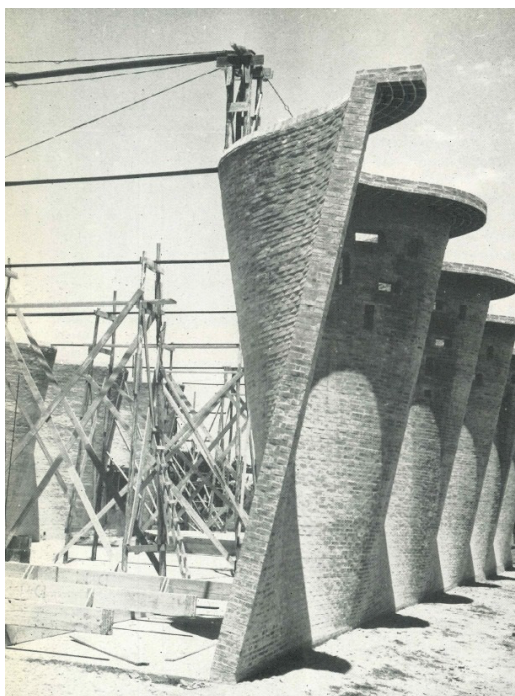
Curved-crease origami představuje oblast skládání, která se od klasického origami výrazně liší svou komplexitou i estetikou. Tato technika spojuje principy geometrie a umění a nabízí nové možnosti pro konstrukci zakřivených povrchů z plochých materiálů. Pro lepší porozumění základů a významu této techniky, je nezbytné nejprve objasnit rozdíl mezi pojmy *crease* a *fold*. Velmi srozumitelně definuje oba pojmy jeden ze zakládajících členů British Origami Society, David Lister.

*„Podle mého názoru **creasing** znamená udělat na papíře (nebo jiném materiálu) záhyb, jehož stopa zůstane i po opětovném rozevření papíru. Mluvíme také o záhybech na látkách, například na lnu, které jsou pověstné tím, že člověk, který má na sobě takový materiál, vypadá pomuchlaně a jako by právě vstal z postele. Záhyb v tomto smyslu si papír, látka nebo jiný materiál "pamatuje". Přesto naši činnost nenazýváme **papercreasing**⁵. Vždy se jedná o **paperfolding**⁶, ...“ [20]*

Crease tedy v češtině znamená záhyb, hranu, vrásku - jedná se o linku zanechanou na papíru potom, co je proveden *fold* neboli přehyb, složení. Tyto dva pojmy spolu ne vždy souvisí. Ne vždy se provádí jedno, aby bylo dosaženo druhého. Věci

⁵Mačkání papíru

⁶Skládání papíru



Obrázek 2.15: Výstavba kostela *Iglesia de Estación Atlántida* [17]



Obrázek 2.16: Stínící clona v pohledu z interiéru, zleva: léto, podzim, zima [19]

jsou často skládány napůl i bez úmyslu vytvořit na nich záhyb a naopak jiné mnohdy získávají přehyby, vrásky, aniž by o ně bylo usilováno, aniž by byly předtím skládány.

Curved-crease origami (na obr. 2.17) by se poté dalo ne zcela elegantně přeložit jako origami se zakřivenými záhyby. Tedy záhyby z křivek, které nejsou v rovině rozloženého papíru přímkami. Skládání podél těchto křivek se od klasického skládání velmi liší. Při skládání po křivce například není možné, aby obě části papíru, které leží na jejich opačných stranách, splynuly. Zatímco u obyčejného origami se model po jednotlivých přehybech vrství a různě překrývá, u curved-crease origami zůstává většina plochy na očích. To s sebou přináší i větší "rozpony" papíru, který musí být zpravidla vyšší gramáže. [21]

Modelování tohoto typu origami je syntézou přímého skládání a ohýbání papíru. Povrch je následně formován zakřivenými hranami a hladkými rozvinutelnými ploš-

kami. Tato syntéza nabízí výhodu při vytváření 3D povrchu z deskových materiálů. Při snaze vytvořit povrch čistě ohýbáním je výsledná geometrie omezena na jednoduché plochy, jako je kuželová nebo válcová plocha. Tradiční origami je naproti tomu flexibilnější v konstruování, ale nemůže představovat hladce zakřivený povrch, aniž by bylo užito dostatečného množství přehybů. Tímto "hybridním" modelováním přehyby vytvářejí různé trojrozměrné plochy pomocí nízkého počtu záhybů. [22]

Jakkoli je však list během modelování skládán či ohýbán, každý bod na něm by stále bylo možné proložit přímkou, výslednému povrchu náležející. Všechny plochy origami jsou tedy rozvinutelné. [21]



Obrázek 2.17: Curved-crease origami [23]

2.2 Strukturální aspekty současné architektury

Struktura, jakožto uspořádání vzájemně souvisejících prvků v daném systému, v architektuře zasahuje nejen do fyzické podoby budov, ale také do jejich funkčnosti i ekonomické efektivity.

Architekti se v rámci své práce zaměřují na porozumění a aplikaci principů geometrie, které jim umožňují navrhovat struktury, jež splňují nejen estetické požadavky. Geometrická analýza přináší hlubší vhled do komplexních vztahů mezi prostorovými formami a jejich interakcí s okolním prostředím.

V této kapitole se autorka zabývá prvky geometrie a jejími zákonitostmi v současné architektuře, zejména pak využitím vlastností rozvinutelných ploch a výhodami, které jejich použití ve stavitelství nabízí.

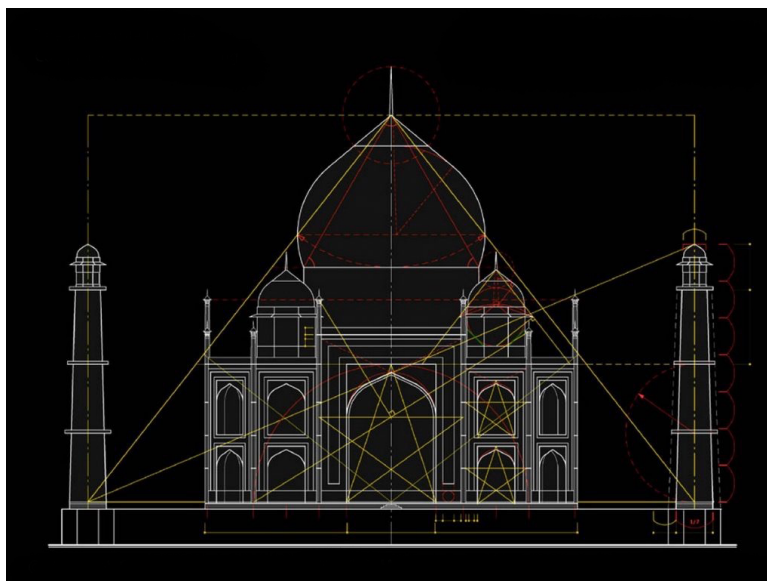
2.2.1 Geometrie v současné architektuře

Podstata geometrie v architektuře spočívá v jejím použití při navrhování a stavbě budov a konstrukcí. Geometrické principy jsou klíčově využity k vytvoření estetických, funkčních a konstrukčně správných návrhů a lze je rozdělit do několika skupin.[24]

1. Tvary - geometrické tvary, jako jsou kružnice, čtverec, trojúhelník, či složitější rovinné útvary, jsou výchozím bodem každého návrhu.
2. Symetrie a proporce - k dosažení rovnováhy a harmonie v architektonickém návrhu.
3. Prostorová organizace - uspořádání geometrických forem v prostoru za účelem vytvoření funkčních interiérových i exteriérových prostor.
4. Strukturální celistvost - aplikování geometrických principů v rámci dalších disciplín k zajištění pevnosti a stability stavby.
5. Inovace a technologie - moderní technologie vycházející z geometrie, jako je počítačem podporované navrhování (CAD).

V minulosti se o geometrii architekti opírali zejména s úmyslem docílit jakéhosi ideálu, kterého se podle nich dalo dosáhnout právě symetrií a správnými proporcemi - znázorněno např. na obrázku 2.18 na str. 18. Zároveň byly budovy vždy stavěny v konkrétním stylu a návrhy tak zůstaly limitované i v tomto směru.

Dnes, když světové architektonické scéně již nadále nedominuje jediný styl, nýbrž se styly mísí či stále vznikají nové, architekti opouštějí normy a novodobé stavby



Obrázek 2.18: Pohled na průčelí Tádž Mahalu znázorňující proporce stavby [25]

připomínají umělecká díla nebo jimi mnohdy doopravdy jsou. Zatímco funkčnost stavby musí být bezpodmínečně zachována a dispozice, nosná část konstrukce i materiálová řešení podléhají požadavkům na stavby, tak vizuální část obálky budovy dává architektovi prostor se svobodně vyjádřit.

Geometrie se v takové chvíli konečně stává nástrojem designu a autor návrhu v ní nachází inspiraci. Často se však nejedná o jednoduché tvary. Do popředí se dostávají různé organické struktury, zborcené plochy, plochy fraktální a v neposlední řadě také tvary inspirované např. *curved-crease origami*, čili prvky tzv. neeukleidovské geometrie.

Jako zástupce lze uvést nechvalně známou stavbu 30 St. Mary Axe Tower nacházející se v Londýně, v Anglii, navrženou Normanem Fosterem, dokončenou v roce 2004, kterou lze vidět na obr. 2.19. Budova je tvořena 40 patry o celkové výšce 180 m. Její tvar je jedním z příkladů užití neeukleidovské geometrie, jmenovitě geometrie eliptické. Jedná se o dvourozměrnou metrickou geometrii, ve které, je-li dán bod neležící na přímce, neexistuje ani jedna nespojitá přímka procházející tímto bodem a součet vnitřních úhlů libovolného trojúhelníku je vždy větší než 180° . V této geometrii jsou navíc všechny přímky uzavřené úsečky s konečnou délkou a dva různé body mohou být spojeny dvěma úsečkami, nikoliv právě jednou.

Tvar objektu založený na této formě umožnil, mimo architektovy snahy o docílení neobvyklého estetického působení, například snížit tlak bočního větru na budovu ve výšce nad okolní zástavbou a zároveň eliminovat sání a s ním vznikající průvan na úrovni ulice, tedy efekt, ke kterému v blízkosti výškových budov mnohdy dochází. [26]



Obrázek 2.19: 30 St Mary Axe Tower, architekt. pohled (vlevo) a fotografie (vpravo) [27]

2.2.2 Organické vs. geometrické formy

Příroda je nekonečnou rozmanitostí tvarů. Všechny vzory a tvary v ní obsahují matematické zákonitosti a odrážejí pravidelnost, celistvost a symetrii, které dohromady utvářejí harmonii. Ve skutečnosti je to právě matematická či geometrická pravidelnost, která přitahuje pozornost pozorovatele. [28]

Může se zdát, že přechod od "řemeslné" architektury po tu "uměleckou" a objevení geometrie ve smyslu architektonického sebevyjádření upouštějícího od striktního dodržování daného stylu je konceptem nového tisíciletí. Avšak článek od architekta Otakara Novotného z roku 1911 pro Časopis Styl [29] dokládá pravý opak.

„Při vyvíjení nové formy počalo se s analogiemi přírody“... „Příroda, jako jindy a v jiných uměních, byla první učitelkou; nemůže sice architektuře znamenati tolik, jako jinému umění, byť i tvořila v mnohých případech analogicky s ní, ale jest aspoň na tolik iniciativní, aby stačila pro prvá tápání“... „Samovolné vynalézání forem bylo by absurdní, neboť neexistují jiné formy, než jaké v přírodě se vyskytují. Příroda je vlastně zcela prostá, v základních motivech dokonce chudá, ale nesmírně bohatá na formální variace, jež připouštějí jen rozumný a příhodný výběr,“ ... „Hledíme-li na tvůrčí proces racionálně, točí se tedy celá otázka kolem dvou možností: formy organické nebo geometrické. Všechny historické slohy v největším svém rozkvětu mluví pro organické oživení a můžeme bezpečně souditi, že i nový sloh jimi bude ovládán.“

Jako geometrické formy jsou zpravidla označovány ty, sestrojené pomocí klasické eukleidovské geometrie⁷. Mezi ty tradičně patří jednoduché tvary jako obdélník, čtverec, trojúhelník, kruh. Tyto tvary bývají stavěny do kontrastu s tzv. tvary organickými, v minulosti považovanými za velice komplexní a nepravidelné.

Příkladem stavby, kde je tento kontrast patrný, je budova muzea dějin polských Židů - POLIN ve Varšavě. Tradiční obdélníkový půdorys je doplněn nepravidelnými tvary vstupujícími do fasády, tvořícími prostor hlavního vstupu a enormní prosklený otvor zajišťující dostatečný přísun světla do budovy. Nosná část konstrukce, navenek striktně zachovávající pravidelnou geometrickou formu, se v interiéru mění na čistě organickou a stěny z vnitřní strany v návštěvníkovi evokují pocit, že se nachází uprostřed jeskyně či rokle (obr. 2.20). Tohoto efektu bylo dosaženo metodou torkretování, čili nanášení betonové směsi nástřikem přímo na armaturu svislé konstrukce.



Obrázek 2.20: Organické prvky v konstrukci budovy muzea POLIN [Autorka]

S objevením nových geometrií a jejich definováním přišlo i porozumění zdánlivému chaosu přírody. I ve složitých biologických strukturách byly nalezeny určité vzorce, které jsou dnes označovány za tzv. biomorfni nebo také organické formy, mezi něž patří symetrie, teselace anebo fraktály.[24] Jelikož je využití symetrie v architektuře zjevné a pojem není nutné objasňovat, v textu jsou vysvětleny pouze pojmy fraktál a teselace a je také uveden příklad jejich užití na konkrétních stavbách.

2.2.2.1 Fraktály

Fraktál lze definovat jako objekt, který je:

⁷Eukleidovská, neboli elementární, je geometrie nám nejpřirozenější, běžně vyučovaná již v rámci základního vzdělávání. Až do 19. století byla považována za jedinou možnou.

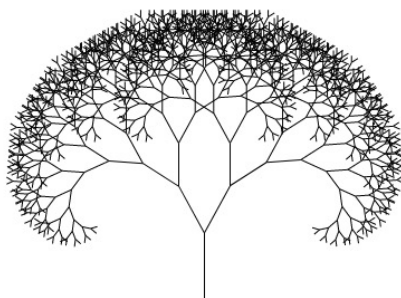
- **škálově invariantní** - pokud je objekt pozorován v jakémkoliv měřítku či rozlišení, lze vidět stále se opakující určitý tvar pro objekt charakteristický (motiv),
- **složitého tvaru** - tvar je však generován opakujícím se užitím jednoduchých pravidel. [30]

Názorným příkladem fraktální geometrie v živé přírodě je zemědělská rostlina druhu *Brassica oleracea* na obrázku 2.21, jejíž rozvětvený meristém tvoří logaritmickou spirálu podle zlatého řezu.

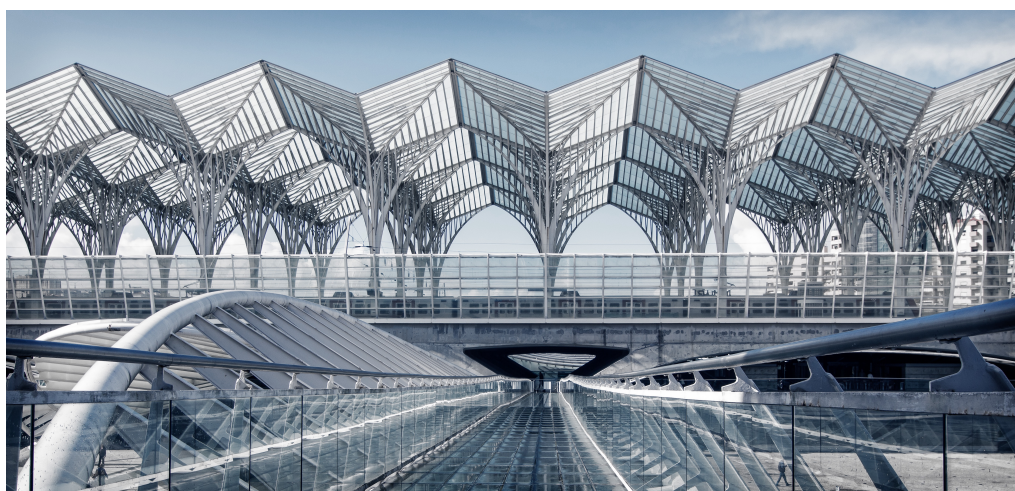


Obrázek 2.21: *Brassica oleracea* [31]

Fraktály byly poprvé definovány až ve druhé polovině minulého století, jejich výskyt v přírodě i jinde však jejich objevením podmíněný není. Dalším typem těchto struktur je tzv. fraktálový strom, využívaný v architektuře již celá staletí. Takový strom vzniká přirozeně větvením. Hlavní větev se rozdělí vedví a každá další větev pak přibývá obdobným způsobem. Na obr. 2.22 lze vidět tuto strukturu vygenerovanou a obr. 2.23 pak tuto, lehce přizpůsobenou, dendriformní strukturu znázorňuje užitou v konstrukci budovy lisabonského nádraží Garo do Oriente od slavného španělského architekta Santiaga Calatravy. Jednotlivé větve zde "vyrůstají" přímo ze sloupů, které mají představovat kmeny, sloužící nejen jako konstrukční opora, ale zároveň jako hlavní část zastřešení. V tomto případě by se měla ocelová žebrová střecha silně podobat palmovému háji. Mimo čtvercových základů sloupů jsou rozvětvené a žebrové prvky tvořeny I-profilů. Hlavní obloukové prvky představující hlavní větve jsou nejen zakřiveny, ale také zúženy, aby se snížila jejich vlastní hmotnost v oblasti vrcholu. Zároveň tímto prvkem umocňují autorem zamýšlenou botanickou analogii i svým vzhledem. [32]



Obrázek 2.22: Fraktálový strom [33]



Obrázek 2.23: Budova nádraží Garo do Oriente v Lisabonu[34]

2.2.2.2 Teselace

Teselace, někdy označována jako mozaika, je označení pro vyplnění povrchu rovinnými obrazci beze zbytku, čili bez překrývání a bez mezer. [35] V přírodě je lze nalézt jako buněčné či krystalové struktury, jako včelí plástve, strukturu kůže plazů nebo skvrny žiraf. Ve stavitelství se s nimi lze nejčastěji setkat v podobě obkladů či nášlapných vrstev podlahy. Jejich využití, které je v rámci této práce řešeno, však přesahuje dvoudimenzionální prostor.

Britské muzeum v londýnském obvodu Camden, jedno z největších a nejvýznamnějších muzeí historie a kultury, se pyšní tím, že zastřešení celého jeho centrálního dvora - Velké dvorany (obr. 2.24), jež je navržena již dříve zmíněným Normanem Fosterem, čítá na 3 312 individuálních skleněných panelů, z nichž ani jeden není identický. Jedná se o největší zastřešený prostor v Evropě. [36] Forma, kterou panely společně skládají celek zastřešení, je teselací. Na první pohled jednotlivé trojúhelníky nebo alespoň jejich část působí, jako by byly shodné, což by mělo mnohem

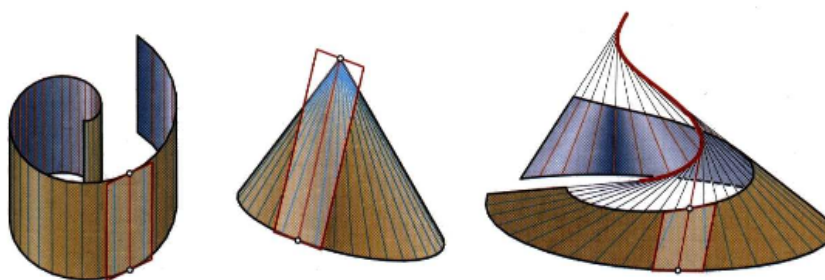
větší význam, vezme-li se v potaz ekonomická stránka designu. O navrhování sítí pro fasády a zastřešení, kde je myšleno na výhodu opakujících se tvarů panelů, je více diskutováno v kapitole 2.3.



Obrázek 2.24: Velká dvorana Britského muzea [37]

2.2.3 Rozvinutelné plochy a jejich užití v architektuře

Stejně jako origami jsou rozvinutelné plochy trojrozměrné objekty, které lze rozvinout do roviny při současném zachování délek jejich oblouků a úhlů jejich křivek. V případě origami tedy bez toho, aby byl papír jakkoli potrhán nebo protažen. Ačkoli zní tato podmínka velmi jednoduše, pro naprostou většinu volných ploch není splněna. [38] Tato třída ploch, chovající se identicky jako papír je v této podkapitole podrobněji zkoumána, matematicky charakterizována, specifikována z hlediska materiálových požadavků (či spíše materiálové variability) a následné aplikace na konkrétních stavbách. Definice v podkapitolách 2.2.3.1 - 2.2.3.3 související s geometrickým vyjádřením těchto ploch jsou převzaty z textu *Architectural Geometry* od Helmuta Pottmanna et al.



Obrázek 2.25: Typy rozvinutelných ploch [38]

Je možné dokázat, že existují jen tři základní typy rozvinutelných ploch a všechny tři jsou plochy přímkové⁸. Zároveň se jedná pouze o speciální podtřídou přímkových ploch, jelikož v každé rozvinutelné ploše se přímky vyskytují systematicky. Navíc

⁸Plocha se nazývá přímková, jestliže každým bodem této plochy prochází alespoň jedna přímka této ploše náležející.

jsou všechny površky⁹ takové plochy torzální - plocha má podél celé površky společnou tečnou rovinu, což je ukázáno na obr. 2.25. Opakem takových ploch jsou zborcené přímkové plochy. Všechny rozvinutelné plochy jsou plochy přímkové, ale ne všechny přímkové plochy jsou plochami rozvinutelnými.

Tyto plochy tedy dělíme na:

- **válcové plochy,**
- **kuželové plochy,**
- **plochy tečen prostorových křivek.**

Lze dokázat, že pokud je nějaká plocha rozvinutelná, je vždy kompozicí těchto tří. Je třeba poznamenat, že rovinné plochy jsou zahrnuty v jakémkoliv z typů - u válcové i kuželové plochy, pokud je zvolena jako profilová křivka přímka, a u plochy tečen, pokud prostorovou křivku nahradíme křivkou rovinnou.

2.2.3.1 Válcové plochy

Válcová plocha je tvořena systémem rovnoběžných přímek. K vytvoření válcové plochy je za potřebí profilová křivka p a její vytažení v nějakém směru r . Přímky, kterými je plocha tvořena, jsou se směrem r rovnoběžné, křivku p protínají a nazývají se površky. Leží-li křivka p v rovině kolmé na směr vytažení r , je křivka zároveň normálovým řezem dané válcové plochy.

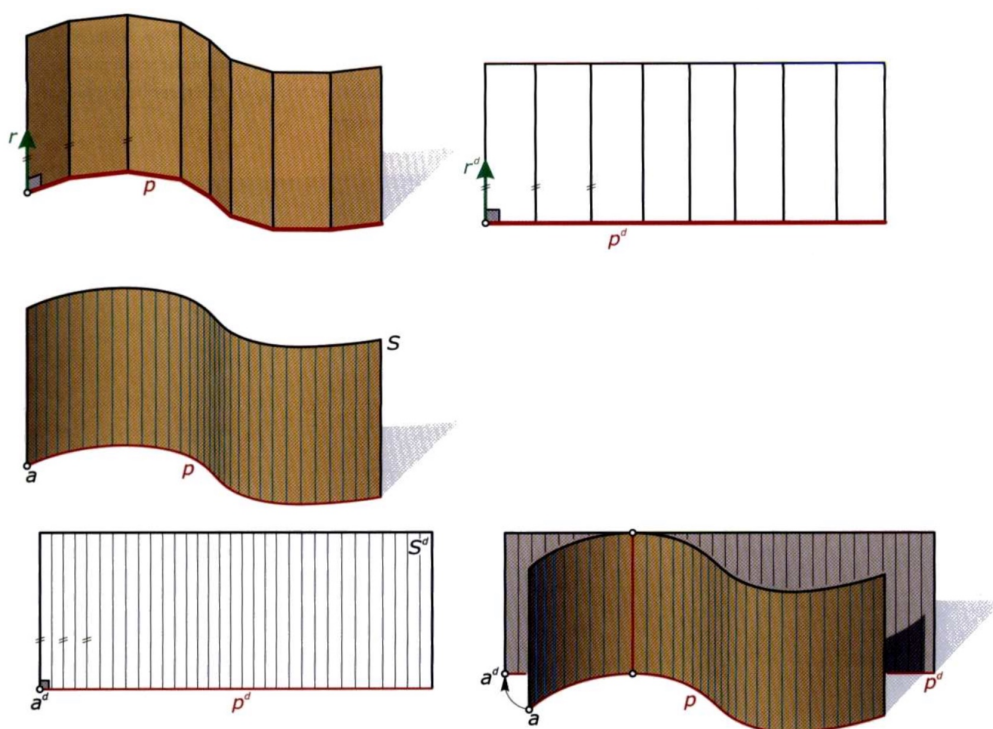
K nalezení rozvinutí válcové plochy do roviny je nejprve uvažován diskrétní model dané plochy, konkrétně ploše odpovídající (vepsaný) prizmatický povrch. Křivka p je nahrazena zvoleným počtem úseček stejné délky (čím je úseček více, tím je rozvinutí přesnější) a ty jsou následně přeneseny a seřazeny vedle sebe. Površky jsou k rozvinutí následně přeneseny jako rovnoběžné přímky. Celý proces včetně porovnání výchozí válcové plochy a jejího rozvinutí je znázorněn na obr. 2.26.

2.2.3.2 Kuželové plochy

Je dána profilová křivka p a bod V , obvykle označovaný jako vrchol. Všechny přímky spojující křivku p s vrcholem V pak tvoří kuželovou plochu. Pokud je profilovou křivkou lomená čára, hovoří se o jehlanu.

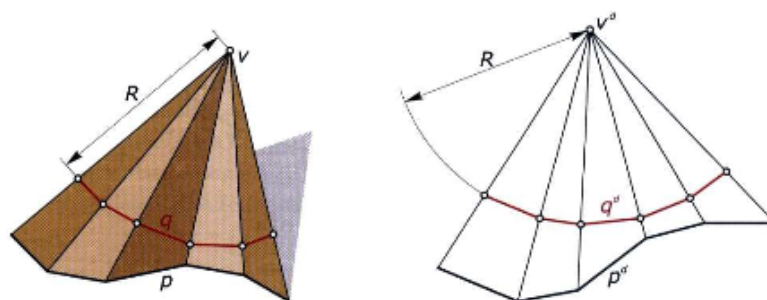
Jehlany lze považovat za diskrétní modely kuželové plochy stejným způsobem, jako jsou prizmatické povrchy (hranoly) diskrétním modelem ploch válcových. Rozvinutí kuželových ploch se pak provádí pomocí jim vepsaných jehlanů. Je vzat polygon q , který jehlanu náleží a jehož vlastní vrcholy mají od vrcholu V konstantní

⁹Povrchové přímky



Obrázek 2.26: Rozvinutí válcové plochy do roviny [38]

vzdálenost R . Tento polygon je obdobou normálového řezu u prizmatických povrchů. Rozvinutí polygonu q má vrcholy na kružnici se středem V a poloměrem R . Toto rozvinutí lze vidět na obr. 2.27. Existuje také hladké rozvinutí kuželové plochy, vzhledem k povaze této diplomové práce a závěrům vyplývajících z její kapitoly 2.3 však není třeba se touto konstrukcí více zabývat.

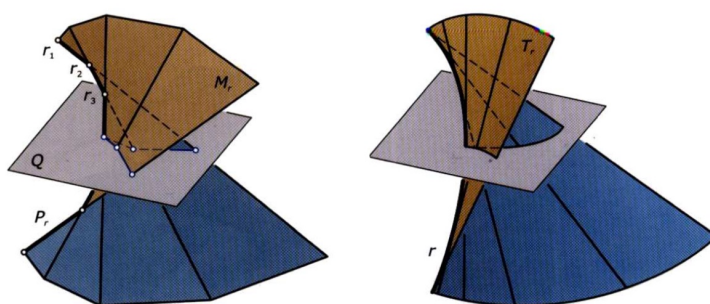


Obrázek 2.27: Rozvinutí diskretizace kuželové plochy do roviny [38]

2.2.3.3 Plochy tečen prostorových křivek

Plocha vytvořená tečnami prostorové křivky p se nazývá plocha tečen prostorové křivky p . Křivka p je hranou vratu¹⁰ této plochy.

Nechť je křivka p diskretizována na polygon P s vrcholy r_1, r_2, r_3 až r_n . Hrany tohoto polygonu jsou obdobou tečen prostorové křivky p . Z tohoto polygonu lze tedy získat diskrétní model M_r rozvinutelné plochy. Libovolné dva po sobě jdoucí vrcholy určují hrany r_1r_2, r_2r_3 atd. modelu. Libovolné tři po sobě jdoucí vrcholy určují čelní plochu $r_1r_2r_3, r_2r_3r_4$ atd. modelu. (Obr. 2.28) Rozvinutelnost plochy tečen prostorových křivek pramení z rozvinutelnosti modelu M_r , který lze rozvinout postupným otáčením jeho částí kolem přímek hran do jediné roviny, aniž by došlo k jejich deformaci.



Obrázek 2.28: Diskretizace plochy tečen prostorové křivky [38]

2.2.3.4 Aplikace v současné architektuře

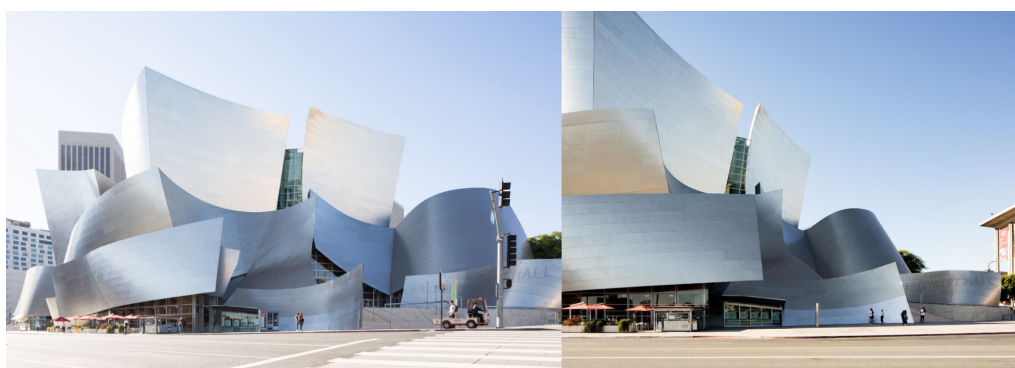
Při hledání nejefektivnějších řešení ve fázi návrhu stavby, tedy vypracovávání architektonické studie, by měly být jednotlivé části návrhu zkoumány jak z hlediska estetického, tak z hlediska možnosti zkonstruování. Čím složitějšího tvaru prvek je, tím komplikovanější (a pravděpodobně i finančně náročnější) bude zhmotnit jej do jeho výsledné a požadované podoby. Jako příklad si lze představit organický tvar proskleného obvodového pláště budovy. Plášť musí být i přes jeho nepravidelnost rozdělen do logických konstrukčních celků, jeho nosná část vyžaduje co možná nejpravidelnější strukturu a velkých rozdílů lze dosáhnout i samotným způsobem zasklení, čili zvolením rovného či ohýbaného skla. Pokud je výchozím tvarem pro obvodový plášť rozvinutelná plocha, návrh je zpravidla možné realizovat s menšími obtížemi.

¹⁰Hrana vratu nebo také křivka singulárních bodů je křivka s křivostí menší, než jakou má prostor kolem ní.

Klíčovou výhodou rozvinutelných ploch je to, že je lze snadno obalit deskovým materiálem, který je tvarovatelný alespoň v jednom směru, např. ocelovým plechem. Vzhledem k tomu, že se zároveň jedná o přímkové plochy, nesou tyto povrchy i systém přímek, což také zjednodušuje jejich konstrukci - např. při konstruování ráků apod. Na následujících příkladech je poukázáno na benefity využití rozvinutelných ploch ve stavební praxi, zejména na celkovém architektonickém pojetí konstrukce nebo na řešení obvodového pláště. Dílčí prvky přidružené stavební výroby využívající rozvinutelnosti materiálu jsou s ohledem na cíle této práce brány jako bezpředmětné a není jim zde věnována větší pozornost.

Na obrázku 2.29 lze vidět strukturu koncertní haly Walta Disneyho od americko-kanadského architekta Franka Gehryho, nacházející se v Los Angeles v Kalifornii. Výraznost architektonických prvků této stavby je tvořena rozvinutelnými plochami, konkrétně válcovými, za jejichž profilové přímky byly zvoleny nepravidelné křivky, jejichž vytažením vznikly některé obvodové stěny jednotlivých úseků budovy či jejich části. Zbylé stěny jsou pak kombinací více typů rozvinutelných ploch.

Pláty z nerezové oceli, které utváří celý finální tvar konstrukce, jsou připevněny k ocelovému roštovému systému. Tvar plátů byl dotvářen na stavbě, každý byl ručně ohnut do požadované podoby a následně připevněn pomocí VHB pásek. [39] Tento způsob opláštění je pro Gehryho velmi typický a aplikace rozvinutelných ploch v tomto případě umožňuje využití pouze jednoho typu plátu o jednom formátu, což značně usnadňuje práci in situ a zároveň je to významně ekonomičtější řešení.



Obrázek 2.29: Koncertní hala Walta Disneyho [40]

Další příklad využití lze nalézt u Smuteční síně na hřbitově nedaleko Kamenice nad Lipou (na obr. 2.30). Samotná síň je kruhového půdorysu, profilovou přímkou rozvinutelné plochy tvořící obvodové stěny je tedy kružnice a stěny tvoří válec. Ten je v osmi místech částečně zešíkmený a plochu střechy tak formují čtyři hřebeny se spádem směrem dovnitř. Střecha je pak do kříže sedlová, připomínající korunu, a konstrukce štítů přímo navazují na stěny až do výšky vrcholu.

Konstrukce nadzákladového zdiva je z plných cihel a je obložena přírodním lomovým kamenem, zatímco vrchní stavbu formuje ocelová konstrukce se skleněnou výplní. [41] Stavba je specifická tím, že její vrchní nosná část je zároveň i opláštěním - ocelová konstrukce nesoucí skleněnou výplň není doplněna o žádné sloupy, jak tomu obvykle bývá, a je na ni uložena lomená železobetonová deska tvořící plochu střechy. Svislé ocelové prvky kopírují povrchy válce a prvky vodorovné jsou spojnicemi mezi nimi. Tabule skla byly zvoleny jako neohýbané, což však u staveb není výjimečné, nemají takové rozměry, aby byl válcový tvar vzhledově narušen a zároveň je stavba opět méně náročná z ekonomického hlediska.



Obrázek 2.30: Smuteční síň hřbitova Kamenice nad Lipou [Autorka]

Výrazně odlišným použitím rozvinutelných ploch je rekonstrukce Emauzského opatství v Praze a přidání dvou protínajících se betonových skořepin (obr. 2.31) namísto dřívějších novogotických věží. Skořepiny mají tvar obecné válcové plochy jejíž výška se od středu do krajů snižuje. Výhoda ve využití tohoto tvaru je spojena s využitím skořepiny obecně. Betonové skořepiny jsou relativně tenké v poměru ke své velikosti a zatížení odolávají zejména právě svým tvarem. Většího ztužení dosahují pomocí protnutí přibližně ve dvou třetinách svojí šířky, čímž také nejvíce vzbuzují pozornost pozorovatele.

Dalším příkladem skořepiny jako rozvinutelné plochy je střecha Auditoria de Tenerife (obr. 2.32) na Kanárských ostrovech od španělského architekta Santiaga Calatravy, která je složena ze dvou protínajících se segmentů kuželových ploch. Tloušťka samonosné betonové konstrukce o délce 100 m se pohybuje mezi 150 - 200 mm a pro její výstavbu byl použit speciální bednicí vůz ze samošplhavého systému spolu s mohutným podpěrným lešením. [42]



Obrázek 2.31: Emauzské opatství [Autorka]

2.3 Diskrétní reprezentace ploch v architektonické geometrii

Nehledě na formu, kterou tvar budovy zaujímá, organickou či čistě geometrickou, ve stavební praxi je zvykem, vzhledem k celkovým rozměrům stavby, rozdělit celek na části, ať už je to v měřítku dilatačních celků, či vnitřních obkladů. Z hlediska statického i logistického (doprava jednotlivých kusů na místo a manipulace na staveništi) se větší části přirozeně dělí na více menších. Stejně tak je tomu u fasád i zasklení. A čím složitějšího tvaru je plocha, kterou je třeba rozbít, tím náročnější je zpravidla najít její správnou aproximaci. Taková aproximace a rozdělení hladké plochy na rovinné mnohoúhelníky se nazývá diskretizace a výsledné zobrazení pak diskrétní reprezentace dané plochy.

Diskretizace rozvinutelných ploch tak, jak je zmíněna v předchozí kapitole 2.2, je do jisté míry bezproblémová. Vybrané povrchové přímky rozdělují plochu na rovinné segmenty, které lze dělit dále, a v závislosti na velikosti segmentů se výsledný tvar více či méně přibližuje původní hladké ploše. Tyto diskrétní plochy jsou pak aproximací těch původních a jejich plošky společně s hranami mezi nimi tvoří jakousi síť. Jistá výzva však přichází, je-li cílem vytvořit takovou síť u plochy volného tvaru. Přesto se s takovými plochami lze v architektonické praxi setkat velmi často a lze je dokonce nazvat trendem dnešní doby. Plochy volného tvaru jsou zahrnuty



Obrázek 2.32: Auditorio de Tenerife [43]

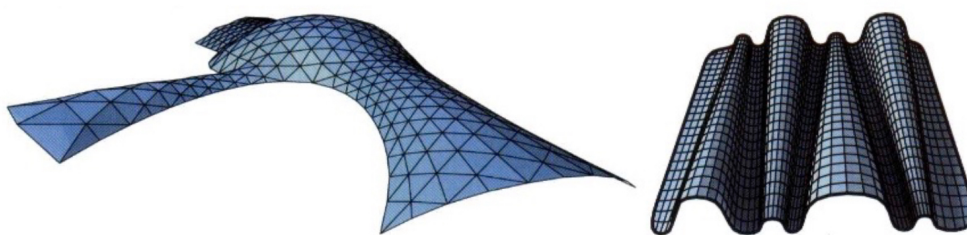
jak mezi organickými, tak i geometrickými formami, které si architekt ve fázi návrhu zvolí. Poté zde vyvstává problém, jak tyto plochy upravit tak, aby si zachovaly požadovaný tvar a zároveň se daly zkonstruovat pomocí rovinných útvarů. S moderními technologiemi jakou je např. generativní design a samozřejmě CAD systémy se problematika diskretizace výrazně zjednodušuje a do procesu vstupují i požadavky na ekonomickou náročnost. Otázkou nyní není jen jak plochu diskretizovat, ale zejména jak to provést takovým způsobem, aby se jednotlivé plošky co nejvíce opakovaly, aby bylo použito co nejméně materiálu, aby proces stavby byl co nejefektivnější apod.

Diskrétní povrchy se mohou vyskytovat v architektuře volných ploch několikařím způsobem. Diskrétní reprezentace nemusí být na první pohled patrná a může být použita čistě u konstrukce podpírající vnější prvky opláštění. Na druhou stranu u konstrukcí, kde se kombinuje sklo s ocelí a u jim podobných materiálů, zvolená síť přímo definuje estetiku celé budovy a proto musí být optimalizována do dostatečné kvality.[38]

Tato problematika se ve stavebním průmyslu vyskytuje poměrně krátce a veškeré předpoklady má v diferenciální geometrii, zejména v diskrétní diferenciální geometrii. Tato kapitola popisuje rozdíly mezi jednotlivými typy sítí, demonstruje jejich využití na konkrétních konstrukcích, a to zejména u opláštění budov, hodnotí vhodnost jejich použití a povrchově zasahuje do navrhování konstrukcí pomocí generativního designu tímto způsobem.

2.3.1 Sítě

V architektuře se v rámci reprezentace povrchů lze nejčastěji setkat se sítěmi s rovinnými stěnami (obrázek 2.33). Jedná se o diskrétní plochy, které jsou definované pomocí svých vrcholů, hran a stěn, kde vrcholy jsou body, hrany úsečky a stěny mnohoúhelníky, kdy je žádoucí, aby převažoval právě jeden typ mnohoúhelníku, např. čtyřúhelník. Plochy se často aproximují i pomocí více druhů zároveň, ve stavitelství je však tento typ aproximace finančně velmi náročný a proto se s ním téměř výhradně nelze setkat. Tyto plošky jsou pak mezi sebou spojeny právě hranami a společně tvoří povrch připomínající hladkou plochu, kdy chyba, o kterou se původní plocha liší od té výsledné, je stanovena předem. [38]



Obrázek 2.33: Diskrétní sítě, zleva trojúhelníková a čtyřúhelníková [38]

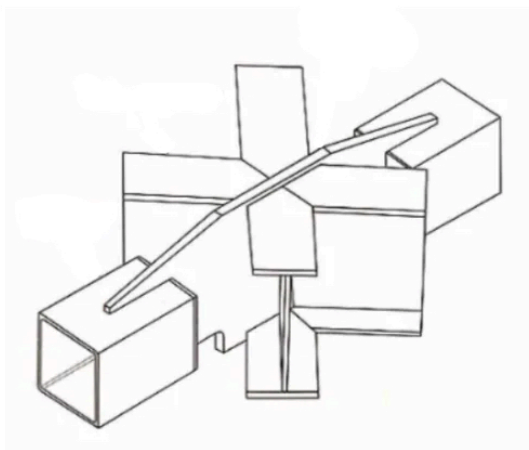
Níže jsou vyobrazeny dva v tomto odvětví nejužívanější typy diskrétních sítí: trojúhelníkové a čtyřúhelníkové, dále sítě polodiskrétní a v závislosti na této problematice jsou také vysvětleny paralelní sítě a s nimi spojená teorie ofsetů a důležitost obého při navrhování konstrukcí pomocí sítí.

2.3.1.1 Sítě trojúhelníkové

Příkladem trojúhelníkové sítě je zastřešení již dříve zmíněné velké dvorany Britského muzea v Londýně na obr. 2.24 na str. 23. Výhoda práce s trojúhelníky spočívá v tom, že tento tvar sám definuje rovinu - tři vrcholy a tedy tři body, a tak zde opadá nutnost řešení rovinnosti jednotlivých plošek. S trojúhelníkovými sítěmi je jednoduché pracovat i z hlediska reprezentace daného povrchu v požadované přesnosti. Ani estetické požadavky zde není složité dodržet a konstrukce zůstává jednodušší i s ohledem na statický výpočet. Nicméně vyvstává zde několik důvodů, proč tento typ sítí není používán v takové míře jako sítě ostatní.

- Estetice konstrukcí z trojúhelníkových sítí značně prospívá, mají-li vrcholy této sítě valenci 6 - tedy v případě, kdy se ve vnitřním vrcholu potkává právě šest hran. Tento požadavek ale výrazně zvyšuje složitost spojů v uzlech. (příklad na obrázku 2.34)

- Navíc, u uzlů trojúhelníkových sítí se přirozeně vyskytuje kroucení, kterému nelze nijak zabránit.
- Cena skleněných panelů trojúhelníkového tvaru na m^2 je v praxi vyšší než u jiných.
- Trojúhelníkové sítě obecně, až na velmi jednoduché případy, nemají ofsety o konstantní vzdálenosti k hranám anebo stěnám. [38] (O problematice ofsetů je hovořeno níže.)



Obrázek 2.34: Spoj ve vrcholu trojúhelníkové sítě o valenci šest [44]

2.3.1.2 Sítě čtyřúhelníkové

Vzhledem k tomu, že k jasnému definování roviny jsou za potřebí právě tři body, čtyřúhelník už obecně nemusí ležet v rovině, čili nemusí být rovinný. Sítě tvořené takovými čtyřúhelníky však nejsou pro architektonickou praxi tak vhodné a v této práci je dbán důraz především na tzv. PQ-sítě (z anglického *planar quad meshes*), což jsou právě takové čtyřúhelníkové sítě, jejichž každý čtyřúhelník je rovinný. Těchto sítí je již využíváno hojně, jelikož je lze snadno aplikovat na různé typy ploch a například u skleněných panelů je rovinnost často preferována. Při použití takových panelů v kombinaci s ocelovými rámy se navíc narozdíl od předchozího typu sítí v uzlech nyní stýkají pouze čtyři hrany, což je z pohledu spojů jednodušší. Těto kombinace je využito na zastřešení obchodního centra Chadstone v Melbourne (lze vidět na obrázku 2.35) s plochou přes 7 000 m^2 a celkovým počtem 2 810 uzlů. [45]

PQ-sítě lze i blíže specifikovat. Existuje-li pro všechny čtyřúhelníky v síti kružnice opsaná, nazýváme pak tuto síť kruhovou. Jsou-li stěny incidentní s vrcholem tečné k rotačnímu kuželu, jehož osou je osa uzlu daného vrcholu, síť nazýváme



Obrázek 2.35: PQ-síť zastřešení obchodního centra Chadstone [45]

kuželové. Pro oba tyto typy sítí vždy existuje síť paralelní, což nelze říci pro PQ-sítě obecně. Tento fakt poskytuje značnou výhodu pro konstruování. [38]

2.3.1.3 Síť polodiskrétní

Protipříkladem k PQ-sítím je kulturní centrum Heydara Aliyjeva v Baku v Ázerbájdžánu od architektky Zahy Hadid (viz obrázek 2.36), kdy každý z panelů je jednoduše či dvojitě zakřivený. Jedná se o takzvanou polodiskrétní síť. Je to síť skládající se z hladkých zakřivených ploch spojených mezi sebou diskrétně. Těchto sítí se v architektuře nevyužívá příliš často vzhledem ke složitosti výroby jednotlivých panelů, zde byla však zvolena kvůli vysokým požadavkům na estetiku tvaru budovy. Vyšší nároky na výsledný tvar však zvyšují náklady jak po výrobní, tak výpočetní stránce. Celá síť byla navržena pomocí generativního designu tak, aby panely vytvářely jednotný zakřivený povrch. [46] Budova je detailně popsána v podkapitole 2.4.4 této práce, která se fasádním panelům věnuje dopodrobna.



Obrázek 2.36: Polodiskrétní síť fasády Heydar Aliyevova centra [47]

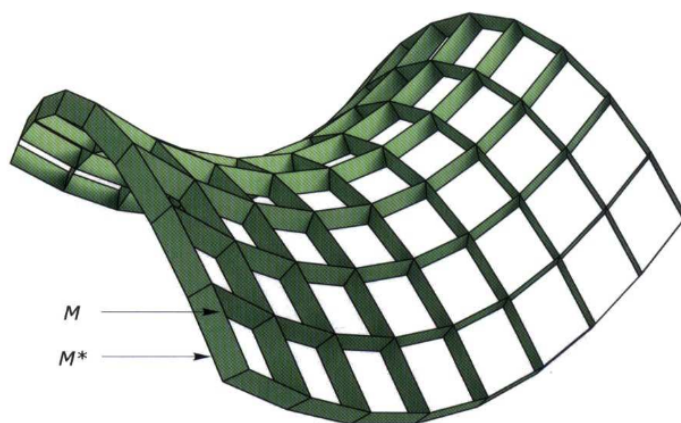
Polodiskrétní sítě se rozdělují právě podle zakřivenosti jejich ploch. Jednoduše zakřivené plochy tvoří *SC-síť* (z angl. *single curved*) a dvojitě zakřivené pak *DC-síť* (z angl. *double curved*). SC-plochy řadíme mezi rozvinutelné a DC-plochy mohou být částí ploch generovaných pohybující se přímkou, posunem jedné křivky po druhé nebo rotací křivky kolem osy.[38]

2.3.1.4 Sítě paralelní a ofsety

Paralelními sítěmi jsou dvě sítě jejichž vrcholy, hrany a stěny spolu jeden na jednoho vzájemně korespondují. Hrany sobě si odpovídající musí být zároveň roznoběžné. K síti existuje nekonečně mnoho sítí paralelních.

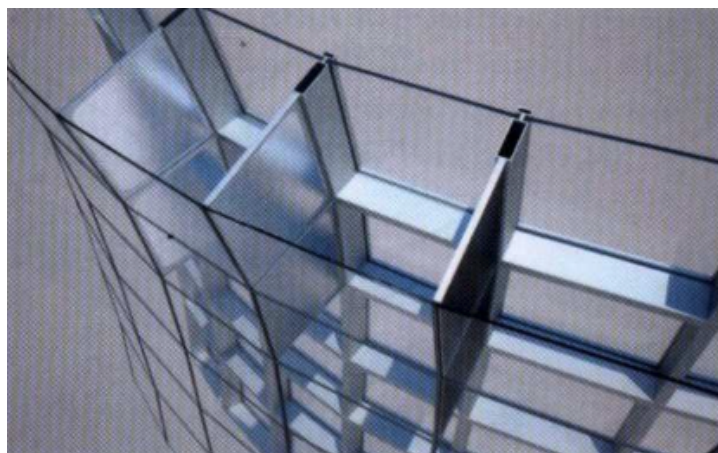
Pro takové dvě sítě pak platí, že pokud má původní síť rovinné stěny, síť k ní paralelní má stěny také rovinné a dokonce s ní roznoběžné. Typ stěn však musí zůstat zachován (k PG-sítím tedy budou paralelní opět PQ-sítě, k šestiúhelníkovým šestiúhelníkové apod.) [38]

Využití paralelních sítí ve stavitelství je evidentní. Využívají se tam, kde je za potřebí umístit více vrstev neplanární konstrukce nad sebou. Přírozeně je totiž vyžadováno, aby takové vrstvy byly k sobě paralelní. Ke dvěma paralelním sítím se pak definuje tzv. geometrická nosná konstrukce. Jedná se o geometricky zjednodušený model konstrukce, která ve skutečnosti spojuje vnější plášť se sítí nosných prvků uvnitř. Tento model tvoří vždy čtyřúhelníky spojující k sobě paralelní hrany obou sítí. [38] Na obrázku 2.37 na str. 34 lze vidět síť M a k ní paralelní M^* , vzájemně spojené čtyřúhelníky v zelené barvě, tedy geometrickou nosnou konstrukci těchto paralelních sítí. Konstrukce dvojitého lehkého obvodového pláště, jako je ta ukázaná na obr. 2.38 na str. 35 a k ní obdobné, mají izolační funkci, geometrická nosná konstrukce slouží ovšem i k určení velikosti nosných prvků, často ocelových, které nesou skleněnou konstrukci vnější pohledové části opláštění. Od takových prvků je očekáváno, že budou mít konstantní výšku, a s tím souvisí ofsetové sítě.



Obrázek 2.37: Geometrická nosná konstrukce sítí M a M^* [38]

Ofsetové sítě neboli ofsety jsou podmnožinou sítí paralelních. O dvojici ofsetů se jedná, pokud mají dvě paralelní sítě od sebe konstantní vzdálenost. To je navíc třeba specifikovat na konstantní vzdálenost od vrcholů, hran nebo stěn a v závislosti na tom existují ofsety vrcholové, hranové či stěnové, v tomto pořadí. Síť mající



Obrázek 2.38: Paralelní síť spojené geometrickou nosnou konstrukcí v praxi - dvojitý LOP [38]

geometrickou nosnou konstrukci s konstantní výškou všech čtyřúhelníků si jsou hranovými ofsety.

Jak již bylo řečeno, pro trojúhelníkové síť je v oblasti architektury tato problematika méně podstatná. Dvou trojúhelníků s rovnoběžnými stranami (zde hranami) se týkají věty o podobnosti či shodnosti trojúhelníků. Paralelní trojúhelníkové síť jsou tedy vždy pouze svou zvětšeninou případně zmenšeninou. To má ale velký vliv na konstrukci. Z charakteru trojúhelníkové sítě a os jejích uzlů vyplývá, že pokud se nejedná o diskretizaci sféry či roviny, dochází k namáhání spojů takové konstrukce krutem. [38] V architektonické praxi u diskretní reprezentace ploch volného tvaru pomocí trojúhelníkových sítí tak není vhodné ofsetů, a tím pádem i vícevrstevných konstrukcí, využívat.

Nejhojněji je tedy užíváno ofsetů, ne pro síť trojúhelníkové, nýbrž pro PQ-sítě. U hranových ofsetů se vychází z výhody konstantní výšky hran zejména u napojování prvků ve spojích - tím, že je zaručena stejná výška, lze prvky bezproblémově napojit a v konstrukci nevznikají nevzhledné "zuby". Hranové ofsety však neexistují pro všechny tvary. Pro libovolný tvar lze najít pouze vrcholový či stěnový ofset, vrcholový u kruhových a stěnový u kuželových sítí.

2.3.2 Využití generativního navrhování

V 90. letech 20. století nastal v procesu navrhování enormní zlom - digitalizace. Organické tvary, které bylo dříve možné navrhovat a zejména realizovat pouze s neuvěřitelnou představivostí (Gaudím, Wrightem apod.), se staly skrz počítače a parametrické nástroje nově vyvinutých programů dostupné téměř všem. To přineslo zcela nové možnosti jak do architektury, tak dalších odvětví. [28] Nicméně navrzení vhodné diskretní reprezentace dané plochy stále nebyla prostá záležitost. Postupem

času se algoritmy pro navrhování nejen diskretních sítí volných ploch přestaly navrhovat "ručně" a trendem poslední doby je tzv. *generativní design*. Některé CAD systémy spolu s umělou inteligencí daly vzniku nástrojům, které dnes umožňují vytvářet precizně optimalizované návrhy.

Generativní design je metoda, která využívá matematických algoritmů k automatickému generování návrhů podle předem definovaných parametrů. Charakterizuje se algoritmickým přístupem, což znamená, že návrhy nejsou pevně dané, ale vznikají v reakci na dynamické interakce mezi různými pravidly, parametry a omezeními. Tím vzniká schopnost vytvářet návrhy, které jsou optimalizované a efektivní v rozsahu, kterého by bylo v reálném čase člověkem jen těžko dosaženo. Mezi výstupy si pak uživatel může vybírat sám nebo dále nechat automaticky vybrat ty nejlepší z nich a ty pak dále optimalizovat na základě ručně stanovených kritérií. Tento proces lze cyklicky opakovat a výstupy zdokonalovat až do požadované podoby – tato forma procesu se nazývá iterativní přístup.

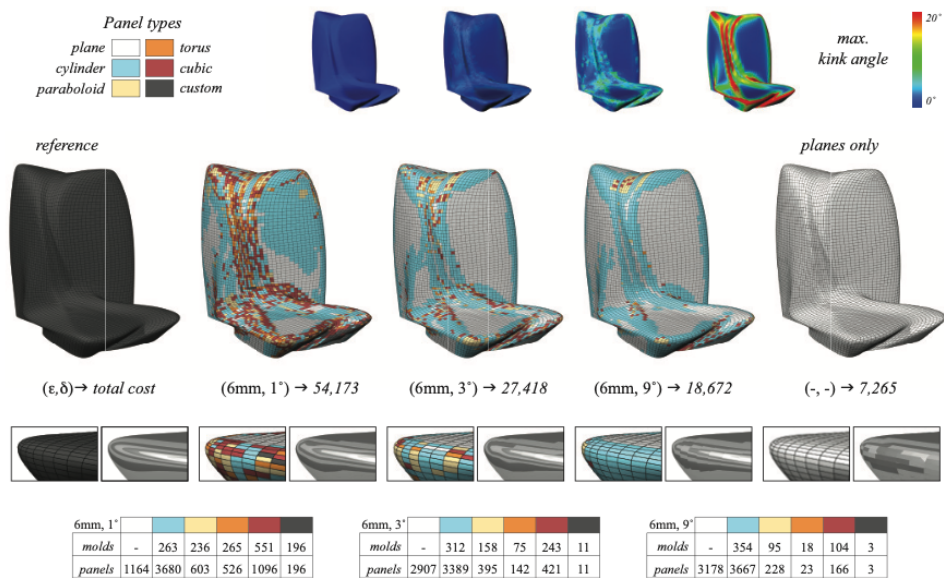
Stavebním kamenem celého návrhu jsou požadavky na model. Designér prozkoumá možnosti, může upravit cíle a omezení a pomocí programu vyhledá optimální řešení. Proces generativního navrhování podstatným způsobem urychluje postupy uvádění výrobků na trh. V iterační fázi návrhu automaticky ohodnotí vyrobitelné varianty a příprava výroby tak může probíhat již jen na předem oklasifikované variantě. [48]

V architektuře stále více roste potřeba navrhovat budovy co nejefektivněji, a to ať už z pohledu energetické náročnosti, udržitelnosti, využití materiálů či prostoru. Pomocí generativního designu lze navrhovat studie staveb i urbanistické studie na základě faktorů prostředí, omezení na místě, lze optimalizovat dopravní tok, přístup pro pěší, dobu oslunění, energetické zisky a další. Stejným způsobem lze generativní design využít i v případě diskretizace ploch. Existují algoritmy, které optimalizují finální plochu tak, aby bylo použito co nejméně typů panelů, aby byly náklady na jejich výrobu co nejmenší nebo všechny požadavky kombinují a hledají nejlepší variantu. [49]

Jedním takovým příkladem je algoritmus z roku 2010 demonstrováný na obrázku 2.39 z vědeckého článku od kolektivu autorů v čele s Michaelem Eigensatzem [50], kde jsou ukázány tři různé iterace polodiskretních sítí fasády budovy, zohledňující tvar panelů (*panel type*) - rovinné (*plane*), válcové (*cylinder*), parabolické (*paraboloid*), anuloidové (*torus*), kubické (*cubic*) a specifického typu (*custom*), včetně počtu jejich forem (*molds*) v závislosti na úhlu ohybu δ s konstantní prahovou vzdáleností ϵ . Čtvrtá varianta je čistě diskretní. Všechny iterace jsou také cenově ohodnoceny (*total cost*). S pomocí GD nyní lze takových iterací vytvořit v krátkém čase mnohonásobně více a zohlednit např. i materiálové řešení panelů.

V porovnání s řešením zastřešení Velké dvorany Britského muzea, kde je použito trojúhelníkové sítě, kdy je každý jeden panel jedinečný a tedy se jeho tvar ani jednou

neopakuje, je fáze iterací a správná algoritmizace nenahraditelnou inovací.



Obrázek 2.39: Iterační fáze diskretizace fasády budovy [50]

2.4 Fasádní panely

S ohledem na charakter práce a její praktickou část je nyní předpokládáno, že fenoménů předem uvedených a vysvětlených se ve stavitelství a architektuře užívá především v oblasti obálky budovy, konkrétně u obvodových pláštů. Obvodové pláště se z hlediska způsobu zhotovení dělí na zděné, monolitické bez či s další povrchovou úpravou, na pláště montované a na lehké ze skla, plechu a tepelné izolace. Právě posledním dvěma typům je v této kapitole udělen prostor.

Obvodový plášť slouží budově jako ochrana jejího vnitřního prostoru proti vlivům vnějšího prostředí, má tedy i izolační funkci, dále disponuje funkcí dělicí a v neposlední řadě má funkci estetickou. Na obvodové pláště jsou kladeny požadavky na bezpečnost a únosnost, trvanlivost a rozměrovou stálost, tepelnou ochranu a akumulaci stálost, průvzdušnost, difuzi a kondenzaci vodních par, dále požadavky na ochranu proti hluku, požární odolnost a také zdravotní nezávadnost, vše dle ČSN EN 13 119 [51].

Pláště lze dále dělit dle tvaru a velikosti prvků nebo dle způsobu osazení a jejich polohy (zapuštěné, přísazené, předsazené či obkladové) a podle těchto kritérií jsou zde rozděleny i fasádní panely, které jsou součástí lehkých obvodových pláštů. Je zde popsána technologie výroby některých panelů. Důraz je kladen na panely pláštů, které nachází své využití i u řešení konstrukcí z ploch geometricky zajímavých, k čemuž je užito zejména lehkých obvodových pláštů.

Lehký obvodový plášť je tradičně složen z vodorovných a svislých stavebních prvků. V závislosti na geometrii konstrukce ale mohou být tyto prvky orientovány různě. Vždy jsou však navzájem spojeny a ukotveny na nosný systém konstrukce. Takový plášť pak definuje prostor uzavřeného nepřetržitého obalu, jenž zajišťuje buď sám anebo společně s nosnou konstrukcí všechny funkce vnější stěny. [52] Podstatnou částí tohoto obalu jsou panely, tedy jednotlivé prefabrikované prvky tvořící většinu plochy pláště.

2.4.1 Klasifikace fasádních panelů

Fasádní nebo dle ČSN EN 13 119 [51] výplňový panel je výplňový či obkladový materiál tvořen buď jedním kusem nebo celou sestavou osazenou do obvodového rámu. Požadavky na tyto panely se řídí ČSN 74 7250 [53] (v případě, že se jedná o zasklení pak ČSN 74 3305), která zároveň udává výčet materiálů běžně používaných. Mezi ty patří hliníkové tažené nebo tlačené obkladové profily, kompozitní materiály, prvky z formovaných nebo válcovaných plechů, svitkových plechů nebo ohýbaných kazet, sendvičové plechy s plastovým nebo jiným jádrem, vysokotlaké dekor lamináty (HPL), keramika, kamenné desky a další.

Následující roztrídění, zpracované dle [52], dělí panely podle typu obvodového pláště.

2.4.1.1 Panely lehkých montovaných pláštů

Mezi tento typ pláštů patří lehké jednovrstvé pláště nebo ty s tepelně izolačními schopnostmi. Panely jsou v nich montovány buď svisle (obvykle na celou výšku podlaží) nebo jsou vodorovně vloženy mezi nosné sloupky.

Panely mohou mít samy izolační funkci anebo být součástí skládaného sendvičového pláště např. z plechových kazet a izolace.

2.4.1.2 Panely celoprosklených pláštů

Panely u tohoto typu pláštů jsou buď celoplošné v rámu nebo jsou to skla montovaná přímo na rámy nebo mezi ně. Panely jsou často v podobě hotových prosklených dílců či jsou to dílce na ocelové konstrukci se zališťováním z vnější strany. Dle potřeby a způsobu užití se panely odlišují z hlediska průhlednosti na čistě průhledné, střídavě průhledné, průsvitné nebo zcela neprůhledné. Jejich tvar závisí na architektonickém návrhu a může být rovinný či se může jednat o panely z ohýbaného skla. Skleněné panely celoprosklených pláštů mohou být ve fasádě také v kombinaci s okenními nebo dveřními dílci.

2.4.1.3 Panely moderních a atypických pláštů

Tyto panely jsou typické svým moderním materiálovým řešením. Často lze vidět panely plastové, kompozitní, kovoplastické nebo mohou být ve spojení s fotovoltaickými prvky či jinými technologiemi, jako je možnost senzorského otáčení atp.

2.4.2 Inteligentní fasádní systémy

Vzhledem k požadavkům na obálku budovy a tedy i obvodové pláště budov, které jsou zmíněny výše, a ke stále narůstajícím nárokům na tepelnou ochranu a s tím spojenou energetickou (ne)náročností budovy, jsou novodobé stavby stále častěji opatřeny různými fasádními prvky, které zajišťují adekvátní vnitřní prostředí v závislosti na podnebí i počasí. Inteligentní fasádou se pak stává ta, která je klimaticky adaptivní v rozsahu proměnlivých okrajových podmínek a má schopnost opakovaně a reverzibilně měnit některé ze svých vlastností v závislosti na čase. Současně v celém procesu hraje velkou roli energetická efektivita a udržitelnost a tyto fasády by také měly mít schopnost sbírat a transformovat okolní energii (převážně tu solární), nejlépe až do takové míry, kterou sama budova spotřebuje. [54] [55]

Cílem aplikace takové fasády je dosáhnout lepších výsledků než při použití fasády čistě jako bariéry mezi vnitřním a vnějším prostředím. Takové fasády co nejlépe využívají okolních podmínek, aby vytvořily ideální vnitřní klima.

Inteligentní fasády lze dělit dle jejich funkčních prvků na ty s dynamickým stíněním, na chromogenní fasády a na fasády s aktivními solárními nebo ventilačními prvky. [56] Z tohoto rozdělení vychází i následující zjednodušená kategorizace inteligentních fasádních panelů:

- **Dynamické fasádní panely** - Panely, které mají nastavitelnou polohu oproti centrální ploše budovy. Řadí se mezi ně stínící panely (obr. 2.40) i ty zajišťující ventilační funkci fasády.
- **Chromogenní zasklení** - Panely tvořené tímto typem skla (jmenovitě se jedná o sklo elektrochromní, termochromní či to s tekutými krystaly) mění své vlastnosti v závislosti na množství slunečního záření a ovlivňují vnitřní prostředí bez nutnosti manuálního ovládání. Ty ručně ovladatelné pak reagují na změnu elektrického napětí.
- **Fasádní solární panely** - V tomto případě je panely přímo zachycována světelná energie. Fotovoltaické panely lze instalovat na fasádu, či je integrovat přímo pomocí speciálních folií či fotovoltaických obkladů.

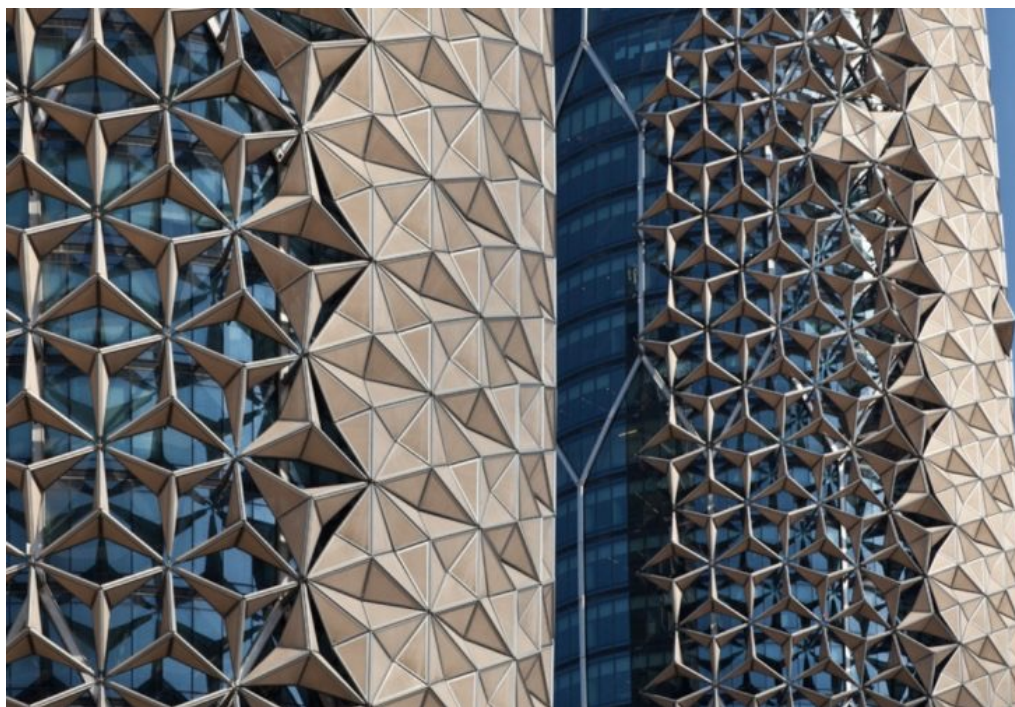
2.4.3 Výrobní technologie zakřivených fasádních panelů

Jelikož je část této práce věnována plochám tvořeným nerovinnými panely, tato podkapitola diskutuje o výrobě takových panelů. Je zde vysvětlena výrobní technologie ohýbaného skla, které je jako materiál užíváno v organické architektuře hojně. Další části se pak zabývají výrobou nerovinných panelů z kompozitů a ohýbaných plechů.

2.4.3.1 Výroba ohýbaného skla

Pro splnění požadavků na energetickou náročnost budovy, jejíž obálku tvoří z většiny skleněno-ocelový plášť, je třeba použít sklo s komplexními povlaky. Tyto povlaky jsou ale často mechanicky i chemicky citlivé a je tedy obtížné je ohýbat, aniž by ztratily své původní vlastnosti. Přesto existuje několik metod, kterých se pro výrobu takových skel používá.

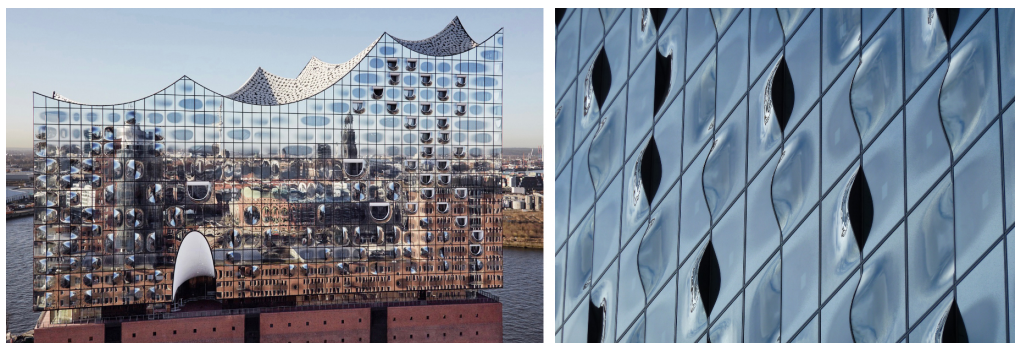
- **Gravitační ohýbání** - proces, při kterém se ploché sklo umístí na formu o požadované geometrii, následně se ohřeje na teplotu přibližně 600 °C. Jak již vyplývá z názvu, sklo se následkem gravitace postupně ponoří do formy a



Obrázek 2.40: Dynamické fasádní panely rozevírající se v závislosti na intenzitě slunečního záření [57]

tak dosáhne žádaného tvaru. Takové sklo není kalené, nýbrž se velmi pomalu ochlazuje. Ke sklu lze přidat lamináty zastávající bezpečnostní funkci. Celkově je však proces výroby časově náročný a povlaky jsou nuceny odolávat vysokým teplotám po dlouhou dobu.

- **Ohýbání za tepla** - proces podobný tvrzení či tepelnému zpevnění s rozdílem, že ve vytvrzovací peci je navíc přítomna flexibilní plocha. Tento postup je vzhledem k tomu, že dochází ke kalení, podstatně rychlejší než postup první, zároveň se však zvyšuje riziko vzniku optické deformace. Toto sklo je na konci výroby ovšem tvrzené a vyhovuje bezpečnostním požadavkům. V závislosti na ploše je také toto ohýbání omezené na konkávní či válcové tvary. Konkávních se užívá poptává-li design konstrukce vyboulení každého panelu zvlášť (obr. 2.41), válcové tvary pak lze využít pouze u SC-sítí, jelikož se jedná o rozvinutelné plochy.
- **Ohýbání za studena** - proces, kdy se skleněná tabule mechanicky přichytí do ohnutého rámování. Vzniklé napětí v tabuli zhoršuje možnosti dalšího zatěžování, proto se pro takové ohýbání volí sklo kalené. Tato metoda se používá pouze pro prohnutí s velkými poloměry a ve stavitelství není hojně užívána. [58]



Obrázek 2.41: Užití konkávního tvaru ohýbaného skla [59]

2.4.3.2 Výroba zakřivených panelů z kompozitů

Celosvětově existuje mnoho společností zabývajících se výrobou nerovinných panelů z kompozitů a samotná technologie pak závisí především na jejich know-how. Zde je uveden postup tvarování pomocí adaptivní formy.

Tímto způsobem lze snadno tvarovat širokou škálu kompozitních materiálů. Jedná se o tvarování pomocí formy skládající se z lůžka o mnoha kolících s nastavitelnou výškou a pryžovou interpolační vrstvou zajišťující hladký finální povrch. Lůžko je celé digitálně nastavitelné, ke správnému tvaru je tedy za potřebí pouze 3D model. Forma je vhodná i pro dvojité zakřivené panely, kdy je geometrie tvaru omezená pouze minimálním poloměrem zakřivení. Výroba je spojena i s vytvrzováním materiálu pomocí pecí či panelů generujících UV záření, v závislosti na materiálu. Touto metodou lze tvarovat například panely z GFRP¹¹. [60]

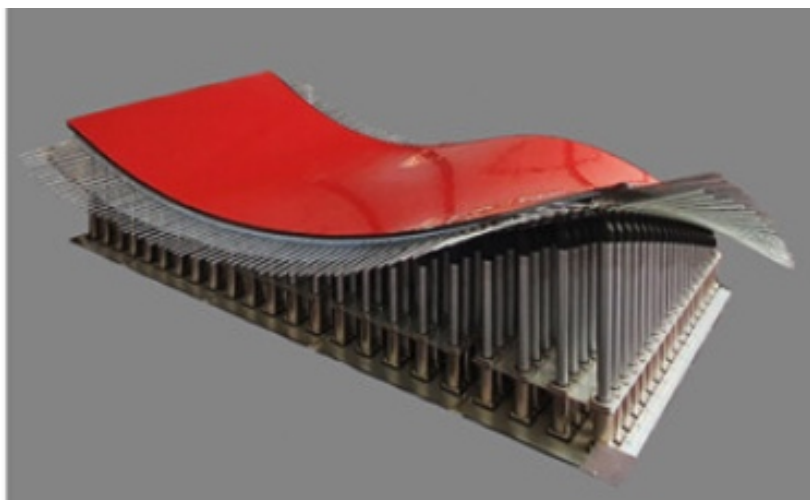
2.4.3.3 Výroba ohýbaných plechů

Ohýbání plechů je klíčovým procesem při výrobě nejen fasádních obkladů. Tento text je cílen na technologii ohýbání plechů specificky pro použití v oblasti fasádních obkladů, čili plechů s velkým poloměrem ohybu. Tento proces může opět zahrnovat ohýbání v jednom směru nebo ve dvou směrech zakřivení.

Ohýbání plechů v jednom směru zakřivení je běžnou metodou a její proces zahrnuje několik různých technik [61], např:

- **Jednoduché ohýbání** - je jednou z nejběžnějších metod pro ohýbání plechů. Používá mechanický lis ("ohýbačku"), který vyvíjí sílu na plech a ohýbá jej kolem pevné formy nebo matrice.
- **Ohýbání pomocí válců** - zahrnuje průchod plechu mezi sadou válců, které ho postupně ohýbají do požadovaného tvaru. Tento postup je vhodný pro

¹¹Polymer vyztužený skleněnými vlákny



Obrázek 2.42: Adaptivní forma na tvarování kompozitních panelů [60]

vytváření dlouhých, kontinuálních ohybů, což je u fasádních panelů často požadováno.

Pro vytváření složitých tvarů fasádních panelů, které vyžadují zakřivení ve dvou směrech, jsou zapotřebí pokročilejší technologie. Mezi hlavní metody patří:

- **Ohýbání pomocí hydraulických a pneumatických lisů** - umožňuje přesné a rovnoměrné ohýbání plechů ve dvou směrech. Tyto lisy jsou často řízeny numericky (CNC), což zajišťuje vysokou přesnost.
- **Hydroformování plechů** - speciální, méně běžná metoda s využitím zejména při práci s komplikovanými a jemnými tvary. Polotovár (neohýbaný plech) se sevře mezi dvěma lisovnicemi. Jedna z lisovnic (matrice) má požadovaný tvar a do druhé je poté přiváděna kapalina, která má po uzavření lisovnicku dostatečně vysoký tlak, aby překonala deformační odpor plechu. Ten se následně tlakem kapaliny vytvaruje dle matrice.[62]

Problematikou ohýbání podle vzoru curved-crease origami se zabývá [63].

2.4.4 Vybrané realizace fasád

Na následujících budovách je demonstrováno použití fasádních panelů v praxi. První dvě budovy disponují obálkou čistě organického tvaru, z čehož první užívá panelů větších rozměrů, dvojité či jednoduše zakřivených, druhá naopak vyniká maloformátovým obkladem z rovinných čtyřúhelníků. Třetí budova reprezentuje využití geometrické formy v kontrastu s tou organickou. Jako panely organické části stavby jsou opět použity SC či DC panely, ovšem v provedení z ohýbaného skla.

2.4.4.1 Heydar Aliyev centrum v Baku



Obrázek 2.43: Heydar Aliyev centrum v Baku [47]

Kulturní centrum Heydara Alijejeva architektky Zahy Hadid z roku 2012 na obrázku 2.43, je příkladem typu fasády navrženého pomocí generativního designu. Celkem 16 150 obkladových panelů společně vytváří jednotný zakřivený povrch, který jako by vystupoval z topografie. Zvedá se, vlní a u základny se stáčí dovnitř, aby zcela obklopil jednotlivé objemy budovy.

Panely jsou buď jednoduše nebo dvojitě zakřivené, aby vytvořily souvisle zakřivený povrch vyrobený z kombinace GFRC¹² a GFRP. Materiál GFRC se používá na povrchy na prostranstvích kolem budovy, které jsou navrženy jako pochozí, zatímco materiálu GFRP bylo užito na panely střešního pláště, které jsou lehčí a nepůsobí na ně takové zatížení. Oba typy mají srovnatelnou barvu i povrchovou úpravu.

Panely bylo třeba vyrobit tak, aby byla dodržena požadovaná geometrie bez nutnosti použití plochých nebo fasetovaných panelů, přičemž jejich způsob výroby měl zůstat ekonomický. Tohoto výsledku bylo dosaženo převedením digitálního 3D modelu popisujícího geometrii do polodiskrétní sítě stávající z jednotlivých panelů s údaji, které bylo možné použít v pružných formovacích tabulích k výrobě panelů metodou *mass customization*¹³. Dále jsou na všech panelech umístěny mikročipy, takže každý z nich lze na staveništi a následně i na stavbě dohledat, což výrazně urychluje instalaci a případné procesy oprav. Proces pokládky panelů lze vidět na obr. 2.44.

Tvarovací tabule byla navržena výrobcem panelů, společností Arabian Profile Company Limited, která vyrábí systémy obvodových plášťů zaměřené na realizaci ambiciózních architektonických návrhů pomocí techniky hromadné výroby na zakázku. Trojrozměrná forma byla popsána mřížkou bodů spojených pravidelnými

¹²Beton vyztužený skleněnými vlákny

¹³Hromadná výroba na zakázku, k návrhům je často využito CAD systémů. Tento termín popisuje proces, při kterém jsou výrobky nebo služby vytvářeny na základě individuálních preferencí zákazníka, avšak s využitím hromadné výroby nebo procesů. Tato strategie umožňuje dosáhnout vyšší míry personalizace a flexibilního přizpůsobení výrobků nebo služeb masovému trhu.



Obrázek 2.44: Pokládka panelů na budovu [64]

křivkami, které vytvářejí jednotlivé zakřivené formy s hranami. Využití této techniky umožňuje rychlou a hospodárnou výrobu složitých obkladových tvarů tvořených geometrií volných ploch ve vysokém standardu. K úpravě tvaru panelu se používají digitálně řízená zařízení s daty poskytnutými 3D modelem. Flexibilní tvarovací tabule využívají digitální vstupy k vytváření vizuálně složitých forem bez nutnosti ruční výroby jednotlivých komponent a s nimi spojených výrobních nákladů. Toto vyhnutí se čistě ručním technikám zajišťuje, že výroba systémů pro složité budovy může být použita i pro fasády velkých rozměrů. [65]

2.4.4.2 **Galerie muzea umění, architektury a technologií (MAAT) v Lisabonu**

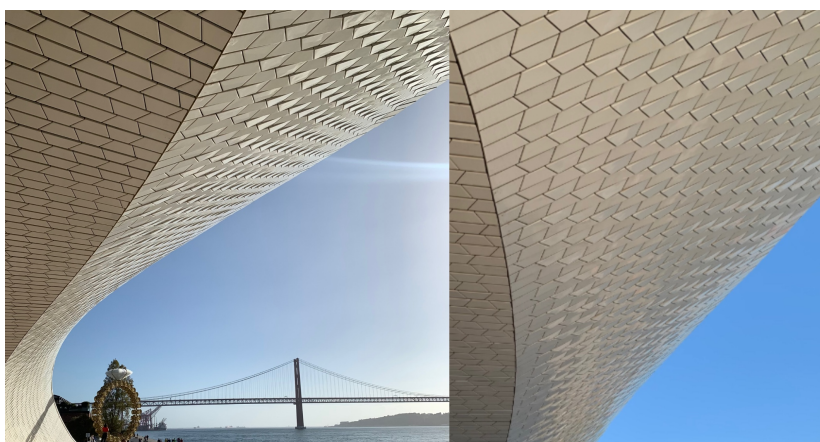
MAAT - muzeum umění, architektury a technologií (na obr. 2.45) se nachází na břehu řeky Tagus, na místě, odkud vyplouvali slavní portugalské mořeplavci. Jedná se o komplex budov, spojující technické muzeum nahrazující prostory zavřené lisabonské elektrárny a v roce 2016 postavenou galerii - organickou budovu, navrženou britskou architektkou Amandou Levete, z velké části zapuštěnou pod úroveň terénu, volně propojující veřejný prostor včetně pochozí střechy ústící v pěší lávku překlenující hlavní silnici a jedinečné výstavní prostory.

Hlavním nosným prvkem průčelí je kruhový dutý profil o průměru 711 mm a tloušťce 60 mm (CHS 711x60) z oceli S355 za tepla zpracovaný, mající tvar oblouku. Volba trubkového profilu zpracovaného za tepla souvisí s jeho vyšší odolností proti vybočení. Jako pomocná konstrukce byla zvolena oblouková příhrada objímající oblouk, ležící s ním ve stejné rovině svírající úhel s terénem přibližně 32°. Podpory oblouku tvoří 1 200 mm tlusté železobetonové stěny, zcela oddělené od zbytku kon-



Obrázek 2.45: Galerie muzea MAAT [Autorka]

strukce. Obě stěny jsou na úrovni základů spojené konstrukcí z předpjatého betonu, a to kvůli mocnosti horizontálních sil působících na oblouk. [66]



Obrázek 2.46: Fasáda galerie muzea MAAT [Autorka]

Na nosnou část bylo dále třeba připevnit konstrukci, která ponese prvky opláštění. To sestává z přibližně 15 000 kusů keramických dlaždic a hlavními architekty bylo definováno takto:

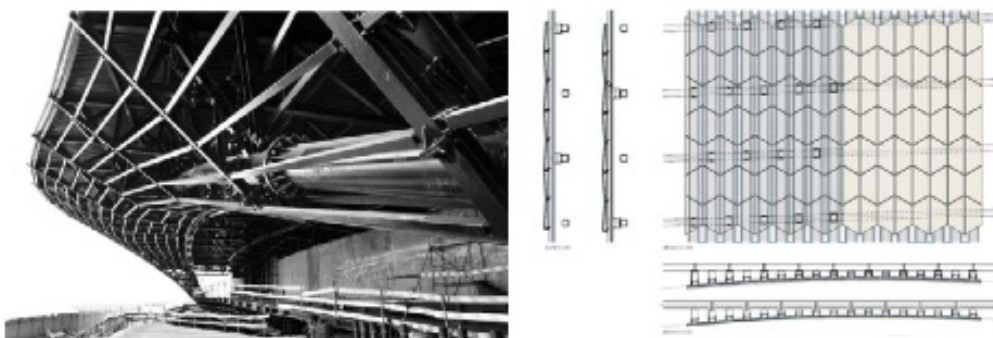
„Na základě bohaté portugalské tradice řemesla a keramiky vytvářejí trojrozměrné glazované dlaždice členitou fasádu a komplexní povrch, který umožňuje proměnlivé vnímání vody, světla a stínu. Převíslá střecha, která

vytváří vítaný stín, slouží k odrazu slunečního světla od vody až do budovy.“ [67]

Detail fasády lze vidět na snímcích na obrázku 2.46, který nahlíží na průčelí ze spodní strany konzoly.

Komplexní geometrie vyžadovala vysoce adaptivní ocelovou konstrukci zaručující správnou lokaci a správné pootočení prvků. K zajištění obého bylo využito třech úrovní (viz obr. 2.47):

1. Vertikální ocelové příhradoviny s podporami v betonové konstrukci budovy nebo se zavěšením z příhrady stropní části.
2. Ocelové vaznice SHS 100x5 po 1 m propojující vertikální zarovnání a otočení, dle konfigurace fasády.
3. Nastavitelné hliníkové profily s malou roztečí pro zarovnání keramických částí - jeden pro kraj a jeden pro střed, připojené k ocelové konstrukci speciálně navrženými svorkami.



Obrázek 2.47: Nosná konstrukce spolu s příhradami a vaznicemi (vlevo), nastavitelné hliníkové profily spolu s dlaždicemi (vpravo) [66]

Výsledný organický tvar konstrukce je tedy v detailu tvořen hliníkovými profily s možností variabilního uložení, čímž vzniká jednotný zakřivený povrch.

2.4.4.3 Hotel Opus v Dubaji

Design této jedinečné stavby je jediným, kterému se jeho architektka, Zaha Hadid, věnovala jak po vnější, tak po interiérové stránce. Hotel byl postaven jako dvě oddělené budovy organicky splývající v jednu. Budova o klasickém ortogonálním půdorysu se totiž uprostřed rozestupuje v prázdný prostor, z jedné strany kompletně uzavřen a z druhé nechávající obě části budovy samostatně (obr. 2.48).



Obrázek 2.48: Budova hotelu [68]

Izolační fasádní panely s dvojitým zasklením jsou opatřeny DC povlakem a zrcadlovým frit vzorem¹⁴, který snižuje sluneční zisky. Organická část fasády, která je zachycena na obr. 2.49, o rozloze 6 000 m² je vytvořena ze 4 300 jednotek plochého, jednoduše zakřiveného nebo dvojitě zakřiveného skla. Vysoce účinné zasklívací jednotky se skládají z 8mm Low-E skla¹⁵, 16mm dutiny mezi skly a 2 vrstev 6mm čirého skla s 1,52mm laminátem z PVB pryskyřice. Pomocí digitálního 3D modelování, byly také určeny specifické zóny, jež vyžadují tvrzené sklo. Během dne odráží fasáda oblohu, slunce a okolní město, zatímco v noci je prázdný prostor osvětlen dynamickou světelnou instalací individuálně ovládaných LED v každé skleněné tabuli. [69]



Obrázek 2.49: Zakřivené panely organické části budovy [68]

¹⁴Fritované sklo je takové, které je potaženo speciálním inkoustem obsahujícím velmi malé částice rozemletého skla - fritu. Frit může být na skleněné tabuli natištěn v podobě jakéhokoliv tvaru.

¹⁵Low-E (z angl. *low emissivity* - nízká emisivita) sklo je navrženo tak, aby minimalizovalo množství infračerveného a ultrafialového záření bez velkých ztrát světla, které prochází dovnitř do budovy. Tato skla jsou opatřena mikroskopicky tenkou povlakovou vrstvou, která je průhledná a zároveň odrazivá.

Praktická část práce sestává z experimentu, který byl proveden v laboratoři, kde byly testovány předem připravené modely fasádního panelu, a z následného porovnání výsledků dosažených zkouškou s výsledky získány softwarovou simulací. K experimentu byly vyhotoveny dva identické modely, u kterých bylo sledováno jejich chování při zatížení, a ke každému z nich byla provedena simulace takového zatížení - jedna pomocí softwaru **Fin 3D** a druhá pomocí **FEAT 1998**. Modely byly navrženy a vyhotoveny na základě vybraných podkladů, které jsou představeny níže.

3.1 Podoba panelu

Výsledná podoba panelu a tedy i jeho modelu je inspirována fasádou budovy, která je zdokumentována v následující podkapitole 3.1.1. Inspirace vychází z teoretické části práce, prvků origami v architektuře, zejména využitelnosti rozvinutelných ploch a jejich aplikace v rámci vybraných materiálů ve stavební praxi.

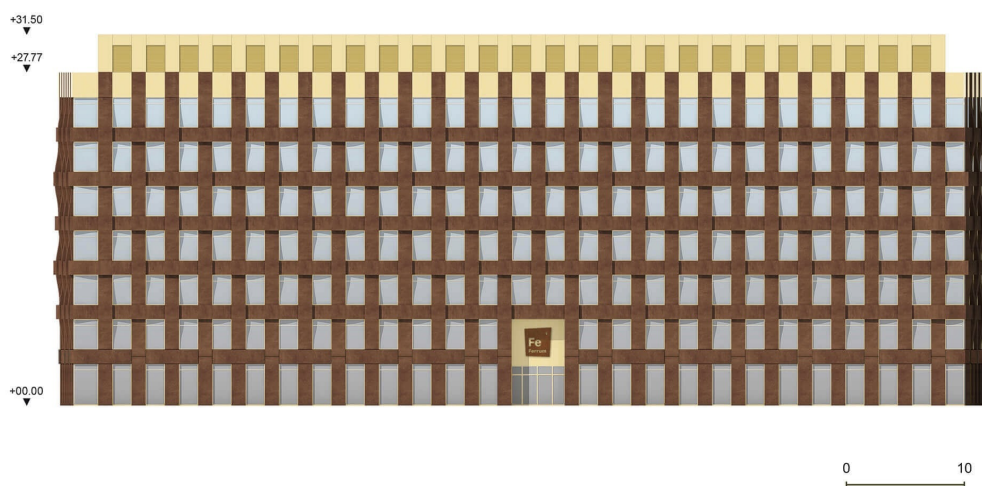
3.1.1 Podkladové dokumenty

Podkladové dokumenty vycházejí z návrhu a realizace budovy Ferrum Business Center v Petrohradě v Rusku (obr. 3.1) od architekta Sergeje Tchobana. Fasádní panely jsou zde vyrobeny z COR-TEN oceli, tedy z povětrnostně odolné oceli, v Česku běžně známé pod názvem Atmofix. Materiál je odolný korozi a po dostatečném vystavení povětrnostním vlivům získává svou charakteristickou patinu v barvě rzi. Jednotlivé panely jsou na fasádě rozmístěny v horizontálním i vertikálním směru tak, že její výsledný tvar připomíná plátňovou vazbu. To je dosaženo tvarem panelu, jehož přední stěna je z plechu ohýbaného do neuzavřené válcové plochy, jejíž profilovou křivkou je sinusoida.

Na obrázku 3.2 na straně 50 je ukázán architektonický pohled stavby a na obr. 3.3 lze vidět přiblížení fasády se zaměřením na vzájemné postavení panelů.



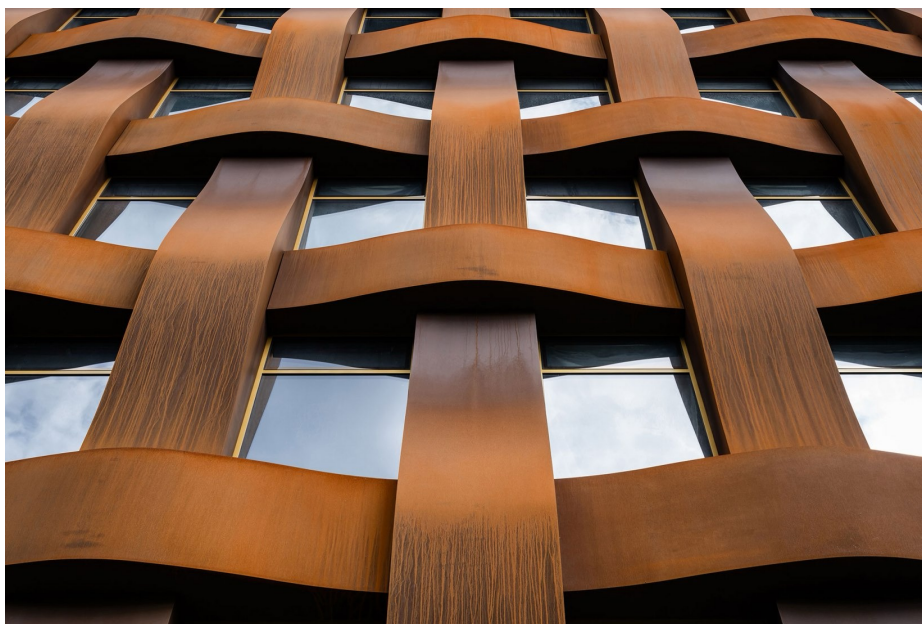
Obrázek 3.1: Budova Ferrum Business Center [70]



Obrázek 3.2: Architektonický pohled severní [70]

3.1.2 Materiálové řešení

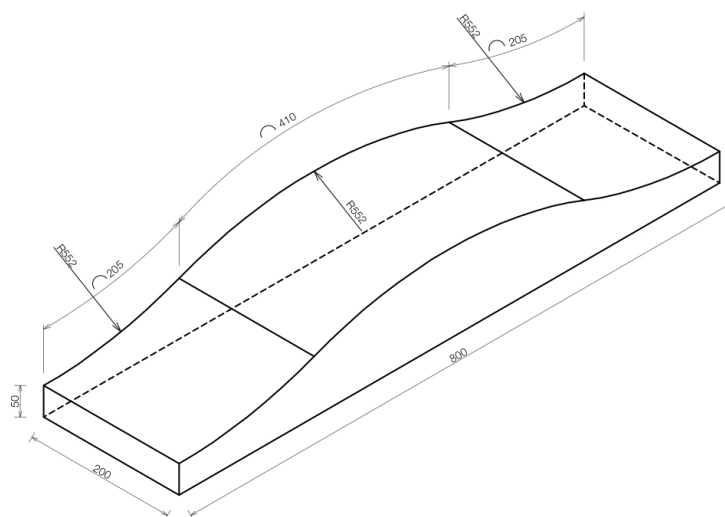
Pro modely bylo uvažováno podobného materiálu, jako je užito v podkladové dokumentaci. Pro účely experimentu nebylo třeba volit kortenovou ocel, byl proto zvolen ocelový plech válcovaný za tepla jakosti S355. Jedná se o materiál vhodný ke svařování, lisování i ohýbání. Jeho tloušťka byla po domluvě s dodavatelem zvolena 2 mm.



Obrázek 3.3: Postavení panelů [70]

3.1.3 Geometrie

Na obrázku 3.4 lze vidět geometrii modelu spolu s finálními zakótovanými rozměry. Celou výkresovou dokumentaci lze nalézt v příloze A v přílohové části této diplomové práce. Všechny hodnoty jsou uvedeny v *mm*. Model byl navržen v měřítku 1:5, výška fasádního panelu pak odpovídá výšce jednoho podlaží.



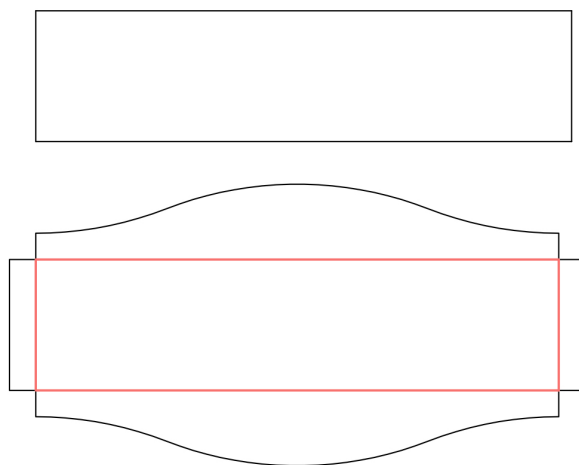
Obrázek 3.4: Geometrie modelu [Autorka]

Je-li uvažována vertikální orientace panelu (tedy taková orientace, ve které byl model zkoušen v laboratoři), celková výška panelu je 800 mm, jeho šířka je 200 mm, minimální tloušťka 50 mm, zatímco maximální tloušťka nacházející se přesně v polovině výšky je 125 mm. Výška modelu byla zvolena tak, aby mohl být otestován ve stroji v laboratoři, ostatní rozměry pak poměrově odpovídají referenci.

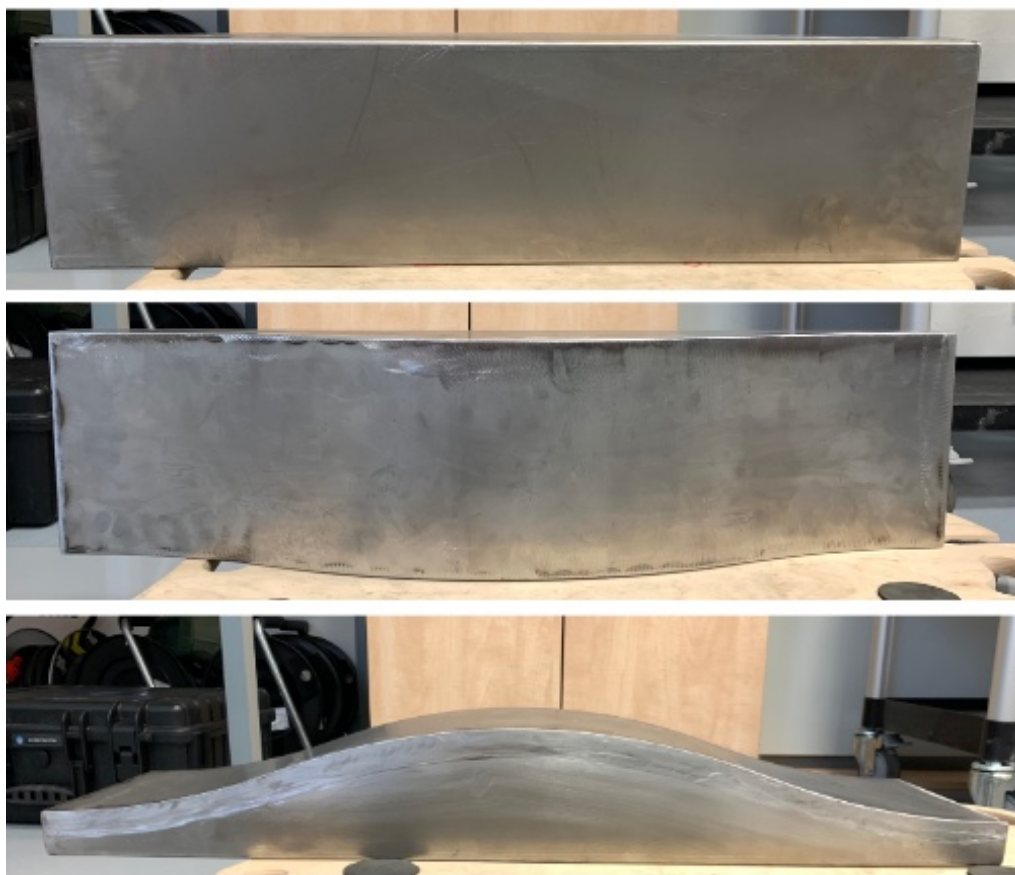
Panel je složen ze šesti stěn, z toho je identická spodní stěna s horní a následně obě stěny boční. Zadní stěna je tvaru rovinného obdélníku, zatímco přední stěna je tvořena válcovou plochou, jejíž profilová křivka je složena ze tří oblouků s jednotným poloměrem 552 mm o různých délkách, znázorněno též ve výkresové dokumentaci. Panel tím dostává dvě osy symetrie - první ve směru výšky v polovině panelu a druhou ve směru šířky, opět v polovině. Jak již bylo uvedeno, tloušťka všech stěn je 2 mm.

3.1.4 Výroba

Výroba obou modelů byla provedena dodavatelem a postup pro výrobu každého z nich je identický. Model sestává ze dvou dílců - 1. přední stěny a 2. zadní stěny s oběma boky a spodní i dolní stěnou. Oba dílce byly vypáleny z ocelového plechu tloušťky 2 mm do požadovaných rozměrů. Tvary dílců jsou znázorněny na obr. 3.5. První dílec byl následně ohnut do odpovídajícího válcového tvaru a dílec druhý byl ze všech čtyř stran zohýbán o 90° s poloměrem ohybu 2 mm. Hrany ohybu jsou na obr. 3.5 znázorněny červenou barvou. Nově vzniklé hrany byly svařeny. Nakonec se oba dílce svařili k sobě ve všech čtyřech hranách. Výsledný tvar ve stavu, v jakém byl dodán dodavatelem lze vidět na obr. 3.6.



Obrázek 3.5: Rozvinutý tvar dílců [Autorka]



Obrázek 3.6: Model fasádního panelu - pohled zezadu, zpředu a z boku [Autorka]

3.2 Zkoušení únosnosti panelu

Tato kapitola popisuje zkoušení únosnosti panelu, které bylo provedeno simulací pomocí statického softwaru a následným experimentem na fyzických modelech v laboratoři. Součástí kapitoly je vyhodnocení softwarových a laboratorních výsledků a jejich porovnání.

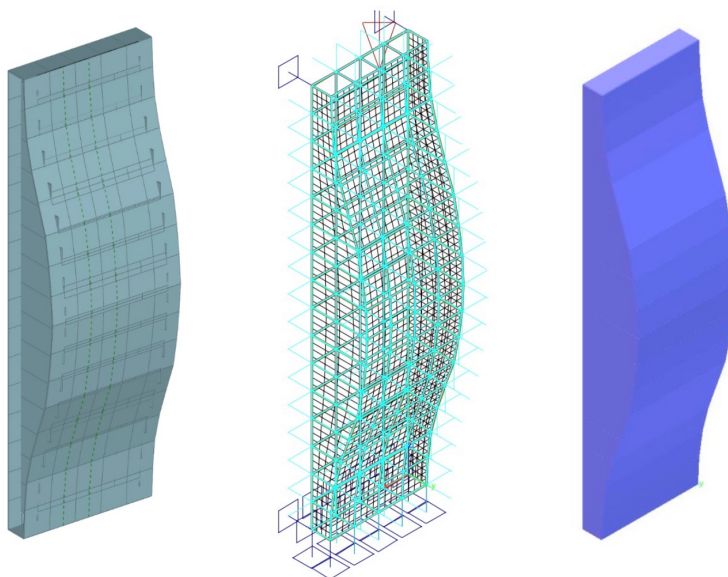
3.2.1 Statický software

Před provedením experimentu v laboratoři byl proveden statický výpočet ve dvou různých softwarech, kdy v každém byl simulován jeden režim namáhání - bodový a plošný tak, aby každý odpovídal jednomu zkoušení. Bodový režim namáhání byl zvolen pro výpočet v programu **Fin 3D** a plošný pak v programu **FEAT 1998**.

Vstupní data byla zadána dle podkladové dokumentace a zejména výše popsané geometrie modelu a také v souladu s modelovou podobností (viz příloha B této

práce). Kvůli specifickému tvaru konstrukce byly stěny diskretizovány na plošky $50 \times 50 \text{ mm}$.

Softwarovou simulací bylo zkoumáno celkové chování modelu z hlediska namáhání na tlak, zjišťovala se únosnost konstrukce. Ve výsledcích lze vidět výsledné napětí v přední stěně modelu i průběhy vnitřních sil. Na obrázku 3.7 lze vidět náhledy na softwarovou konstrukci v prostoru v obou programech. Všechna vstupní data včetně zatěžovacích stavů i výsledky výpočtů byly vyexportovány ze softwarů a jsou k dispozici v přílohách C a D této práce.



Obrázek 3.7: Náhled na konstrukci v prostoru ve **Fin 3D** (vlevo) a ve **FEAT 1998** (uprostřed a vpravo) [Autorka]

3.2.2 Laboratoř

3.2.2.1 Pomůcky a nástroje

Ke zkoušení bylo použito zkušební zařízení Zwick Roell Z050, které smí obsluhovat jen pověření pracovníci, celé zkoušení tedy proběhlo s pomocí a pod odborným dohledem Ing. Jana Krystka, Ph.D. Zkušební stroj je doplněn softwarem **TestXpert II**, který v průběhu zkoušek zaznamenával všechna data.

Zkoušení modelů bylo po celou dobu zaznamenáváno také fototechnikou, konkrétně dvěma fotoaparáty značky Canon umístěnými před strojem na stativěch. Testovací stroj spolu s umístěnými fotoaparáty lze vidět na obr. 3.8.

Pro načrtnutí sítě na horní část předních stěn testovaných modelů bylo použito pružné kovové pravítko.



Obrázek 3.8: Průběh zkoušky [Autorska]

3.2.2.2 Experiment

Experimentální část práce byla provedena v laboratoři na Fakultě aplikovaných věd pomocí zkušebního stroje Zwick Roell Z050. Stroj byl v horní části opatřen klínovými šroubovacími čelistmi, do kterých byly následně sevřeny dva typy přípravků. U zkoušení prvního modelu byl užít přípravek s ocelovým válcem orientovaným tak, aby jeho podélná osa byla rovnoběžná se zemí a kolmá na delší stranu horní stěny modelu. Pro druhý model se mezi čelisti vložil ocelový kvádr. Před zahájením zkoušky byl mezi tento kvádr a model vložen navíc mezikus, který roznesl působící sílu na větší zatěžovací plochu.

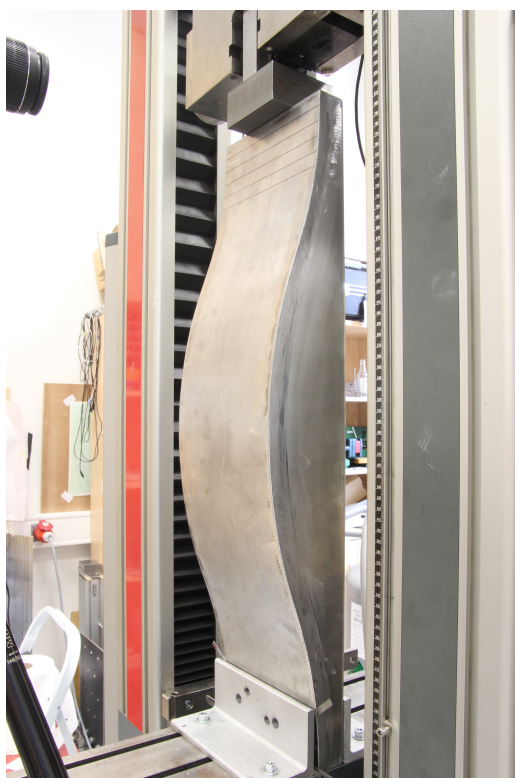
Oba modely byly do stroje upnuty stejným způsobem i se stejnou orientací. Model byl nastaven do vertikální polohy tak, aby byl strojem zatěžován centricky v jeho podélné ose a respektoval jeho ortogonalitu. Přední stěna byla orientována na fototechniku. Takto byl model uchycen mezi dvěma ocelovými úhelníky, které byly přišroubovány do drážek stolu, čímž byla zajištěna jeho pozice pro provedení zkoušky. Pro vyrovnání zakřivení plochy přední stěny bylo nutno mezi přední úhelník a model umístit v jedné nebo ve dvou výškách distanční podložky. Poté bylo možné nastavit stativy s fotoaparátů k následné dokumentaci zkoušky s frekvencí snímání 1 snímek za 5 vteřin. Orientaci modelu i způsob přichycení lze vidět na obr. 3.9.

Než byla zahájena zkouška došlo k nastavení extenzometru pro měření deformace a také rychlosti posuvu tlačné hlavy stroje, ta byla nastavena na 2 mm/min . Během zkoušky byl měřen čas, síla působící na model a jeho deformace. Všechny naměřené hodnoty byly zaznamenávány pomocí programu **TestXpert II**.

Zkoušení proběhlo na dvou identických modelech fasádních panelů. Každou zkouškou, která simulovala zatížení od pomyslné konstrukce pláště, ve kterém by byly panely instalovány, byly testovány materiálové charakteristiky a únosnost panelu a také celkové chování panelu, a to zejména zda dojde v konstrukci ke vzpěru anebo k boulení přední stěny.

Zkoušky byly celkem tři. První model byl zkoušen jednou, byl zatížen liniově pomocí válce. Pro druhý model byl válec nahrazen kvádrem s kontaktní plochou $100 \times 50 \text{ mm}$. Tímto způsobem ale nedošlo k viditelné deformaci modelu, a to ani při maximální hodnotě zkušební síly $F_{max} = 50\,000 \text{ N}$, kterou je stroj schopen vyvinout. Bylo tedy nutno provést další zkoušku, nicméně v režimu namáhání bez pomocného mezikusu, tedy s menší zatěžovací plochou $30 \times 50 \text{ mm}$. Poté bylo již deformace modelu dosaženo.

Oba modely byly opatřeny liniovou sítí, která byla využita při vyhodnocování boulení přední stěny. Na prvním modelu byla vyznačena až po provedení zkoušky, u modelu druhého byla načrtnuta předem.



Obrázek 3.9: Orientace a uchycení modelu ve stroji [Autorka]

3.2.2.3 Naměřené hodnoty

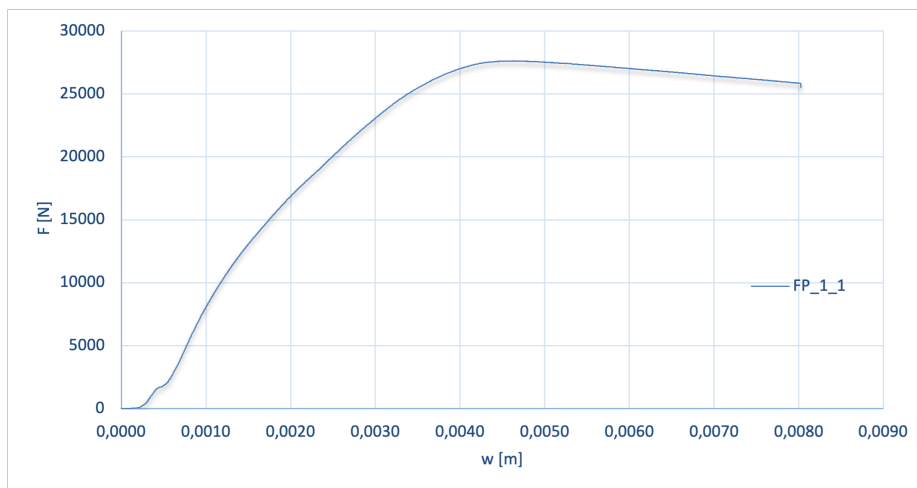
Na následujících stranách jsou tabulkově vyčteny všechny podstatné údaje o průběžích zkoušek, graficky znázorněny závislosti působící síly na deformaci modelu a fotograficky zachyceny počáteční a koncové stavy zkoušek. Název zkoušky se řídí pravidly označení - *FP*, jako fasádní panel, první číslo označuje číslo modelu a druhé pak číslo zkoušky daného modelu.

Zkouška FP.1.1.

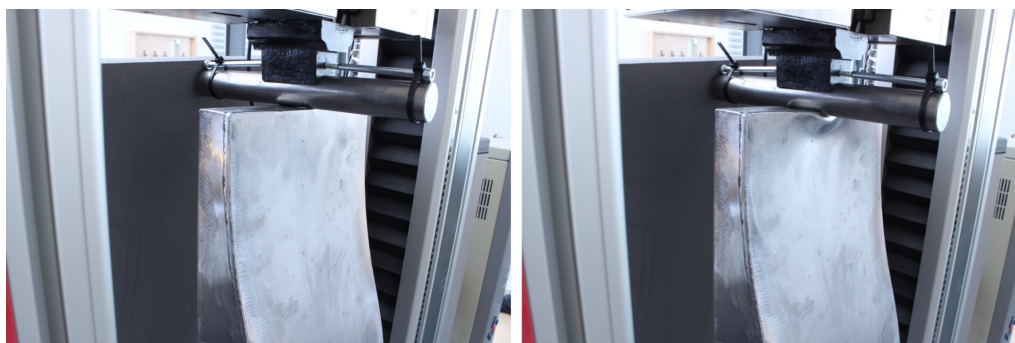
První zkouška proběhla na modelu č. 1 za použití přípravku s ocelovým válcem o průměru 35 mm, který simuloval liniové zatížení. V tabulce 3.1 jsou uvedeny údaje o zkoušce, grafické znázornění působící síly a na ní závislé deformace lze vidět na obr. 3.10 a na obr. 3.11 je zachycen model na počátku zkoušky a v momentě jejího ukončení.

Tabulka 3.1: Údaje o zkoušce FP.1.1 [Autorka]

Datum provedení zkoušky	26.4.2024
Začátek zkoušky t_0	10:27:33
Konec zkoušky t_1	10:31:48
Rychlost posuvu	2 mm/min
Maximální zkušební síla F	27 628 N
Deformace w	8,026 mm



Obrázek 3.10: Zkouška FP.1.1 - graf závislosti působící síly na deformaci modelu [Autorka]



Obrázek 3.11: Zkouška FP.1.1 - počáteční a koncový stav [Autorka]

Zkouška FP.2.1.

Druhý model byl testován v režimu plošného namáhání. Kontaktní plocha, která při této zkoušce spojovala model se strojem, byla dosažena umístěním kvádru o rozměrech spodní podstavy $100 \times 100 \text{ mm}$ mezi model a kvádr sevřený čelistmi stroje. Celková plocha kontaktu byla tedy $100 \times 50 \text{ mm}$ (na celou tloušťku modelu

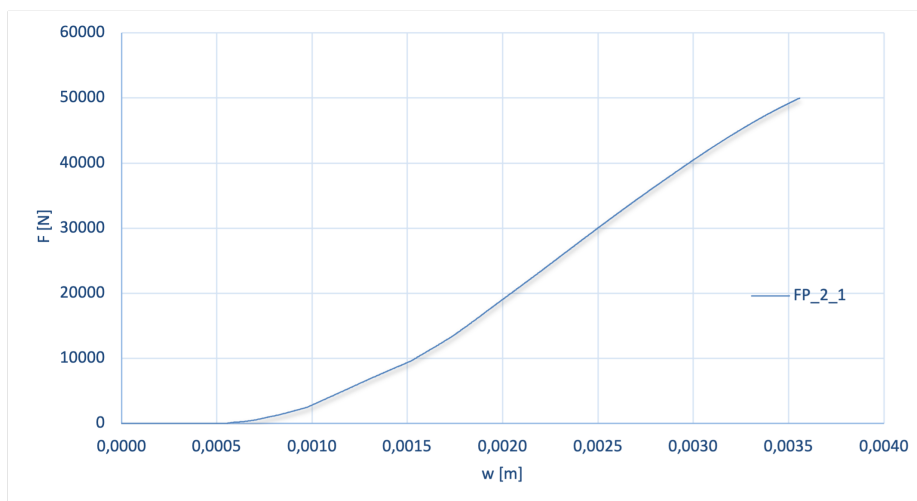
Tabulka 3.2: Údaje o zkoušce FP.2.1 [Autorka]

Datum provedení zkoušky	3.5.2024
Začátek zkoušky t_0	9:30:19
Konec zkoušky t_1	9:32:14
Rychlost posuvu	2 mm/min
Maximální zkušební síla F	50 000 N
Deformace w	3,559 mm

50 mm a na šířku kvádrů). Tímto způsobem ale nedošlo k viditelnému zdeformování modelu, a to ani při maximální hodnotě zkušební síly $F_{max} = 50\,000\text{ N}$, kterou je stroj schopen vyvinout. Model byl tedy použit znovu pro zkoušku další.

Z výsledků je však patrné, že model by byl v tomto režimu namáhání schopen odolat většímu zatížení alespoň 50 000 N.

V tabulce 3.2 jsou uvedeny údaje o zkoušce, grafické znázornění působící síly a na ní závislé deformace lze vidět na obr. 3.12 a na obr. 3.13 je zachycen model na počátku zkoušky a v momentě jejího ukončení.



Obrázek 3.12: Zkouška FP.2.1 - graf závislosti působící síly na deformaci modelu [Autorka]



Obrázek 3.13: Zkouška FP.2.1 - počáteční a koncový stav [Autorka]

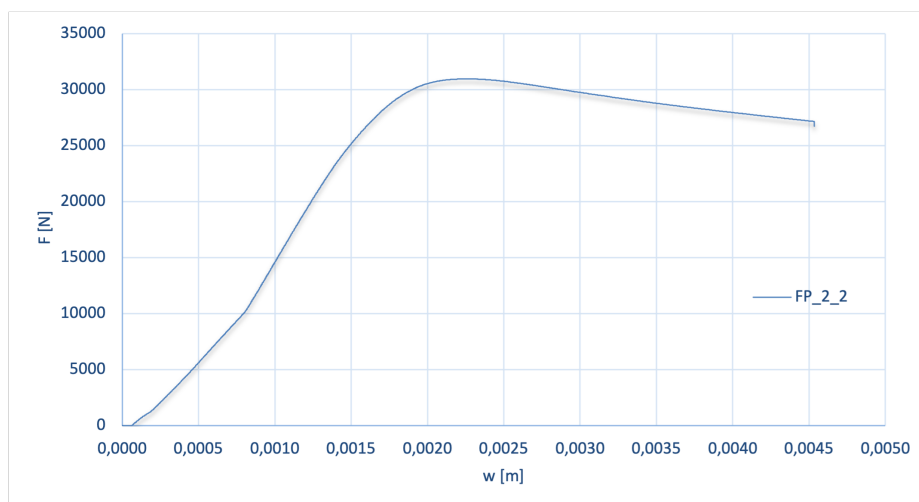
Tabulka 3.3: Údaje o zkoušce FP.2.2 [Autorka]

Datum provedení zkoušky	3.5.2024
Začátek zkoušky t_0	9:39:15
Konec zkoušky t_1	9:41:30
Rychlost posuvu	2 mm/min
Maximální zkušební síla F	30 966 N
Deformace w	4,534 mm

Zkouška FP.2.2.

S ohledem na výsledek předchozí zkoušky bylo rozhodnuto provést zkoušku novou, se zmenšenou kontaktní plochu. Původní mezikus vložený mezi stroj a model byl odebrán a model byl dále namáhán v režimu s kontaktní plochou $30 \times 50 \text{ mm}$.

V tabulce 3.3 jsou uvedeny údaje o zkoušce, grafické znázornění působící síly a na ní závislé deformace lze vidět na obr. 3.14 a na obr. 3.15 je zachycen model na počátku zkoušky a v momentě jejího ukončení.



Obrázek 3.14: Zkouška FP.2.2 - graf závislosti působící síly na deformaci modelu [Autorka]



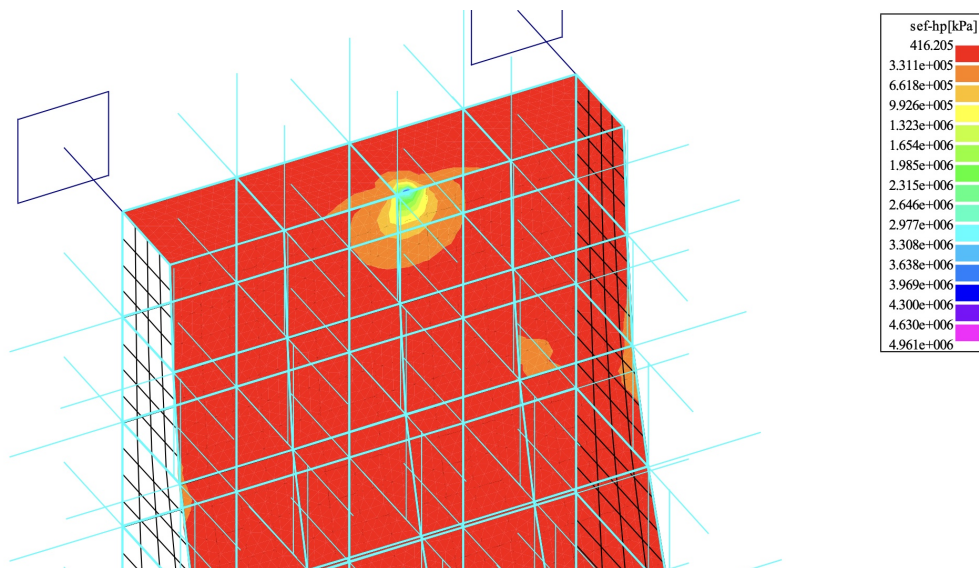
Obrázek 3.15: Zkouška FP.2.2 - počáteční a koncový stav [Autorka]

3.2.3 Vyhodnocení výsledků

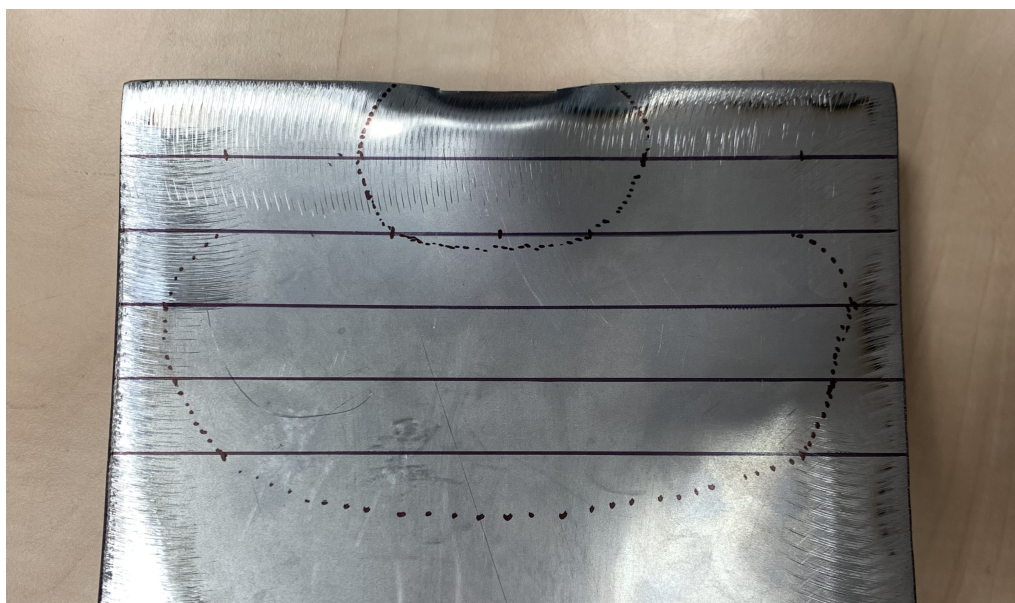
Z výsledků experimentu vyplývá, že čím větší je kontaktní plocha, skrz kterou je působeno na model, tím větší je jeho únosnost, což bylo předpokládáno. Model byl zatěžován v různých režimech namáhání, klíčové jsou však výsledky první zkoušky, kdy byl model zatěžován liniově přes válec - jedná se o nejkritičtější variantu. Takto namáhaný model experimentálně dosáhl únosnosti 27 628 N. Toto namáhání bylo předem simulováno v softwaru **Fin 3D** a při zvoleném proměnném zatížení 25 000 N, s výpočtem pro nejneprůzračnější kombinaci prostého tlaku a ohybu, vyhověl průřez při posouzení s využitím 99 %. Při srovnání experimentální hodnota dosahuje 110 % hodnoty vypočtené softwarem, což je považováno za relevantní výsledek ve shodě, navíc ve prospěch bezpečnosti.

Porovnání napětí na přední stěně modelu lze vidět na obr. 3.16, který znázorňuje rozložení napětí na konstrukci v simulaci ve **FEAT 1998**, a na obr. 3.17, kde je tečkovaně

naznačena hranice boulení přední stěny modelu po zkoušce FP.2.2. Kromě největší koncentrace napětí v těsné blízkosti působení zatížení lze vidět shodu i v levé krajní části modelu, mezi čtvrtou a pátou linií sítě.



Obrázek 3.16: Rozložení napětí v horní části konstrukce ve FEAT 1998 [Autorka]



Obrázek 3.17: Hranice boulení přední stěny modelu po zkoušce FP.2.2 [Autorka]

Dále lze vzhledem k výsledkům zkoušení tvrdit, že normálová síla N působící na model v jeho podélné ose způsobí u modelu lokální deformace ve formě boulení

přední stěny dříve, než se tato síla stane kritickou silou F_{Cr} a tedy než u modelu dojde ke globální deformaci vlivem vzpěru.

Na základě modelové podobnosti lze tvrdit, že únosnost fasádního panelu, ke kterému se vztahuje původní měřítko 1:5, o délce 4 m, při zachování velikosti zatížení, tloušťky plechu, materiálových charakteristik a poměrů geometrie, bude identická. Ze zkoušení tedy vyplývá, že při liniovém zatížení působícím v kratším směru horní stěny dosahuje únosnost fasádního panelu hodnoty nejméně 25 000 N. Takový typ namáhání byl před zahájením zkoušení vyhodnocen jako nejkritičtější, což výsledky z laboratoře potvrzují. Přesný typ uložení a ukotvení jednotlivých panelů ve fasádním systému nebyl autorce znám, bylo proto uvažováno kritické varianty - uložení jednotlivých panelů na sebe takovým způsobem, kdy jsou panely uvažovány jako nosné a spojeny jsou liniovými prvky přenášejícími zatížení bodově či liniově.

Tato varianta byla uvažována mimo jiné i proto, že zahrnuje působení sil na zakřivenou část konstrukce a bylo díky tomu možné otestovat její chování jak v softwarové simulaci, tak experimentálně v laboratoři.

Experiment byl limitován omezeným počtem modelů, a to kvůli finanční náročnosti výroby. K posouzení celkového chování panelu jako součásti fasády, např. jeho únosnosti v ohybu při zatížení větrem (sání) a porovnání s hodnotami rovinných panelů atp. by bylo třeba disponovat více modely. Další testování tak zůstává předmětem dalšího zkoumání.

Po vyhodnocení výsledků lze říci, že konstrukce panelu se nechovala neočekávaně a při použití zamýšleného způsobu kotvení je panel vhodný k použití jako součást lehkého obvodového pláště budov. Zatížení zakřivené stěny panelu tak, jak bylo provedeno během zkoušení, výrazně nezmění chování konstrukce.

Tato diplomová práce je zaměřena na využití principů origami v moderní architektuře. Prostřednictvím teoretické části je analyzována historie a základní principy origami, jeho využití v různých oborech, včetně fenoménu curved-crease origami. Následně jsou řešeny strukturální aspekty současné architektury, včetně geometrických a organických forem, rozvinutelných ploch a jejich využití, a podrobně je zde řešena diskrétní reprezentace ploch v architektonické geometrii. Všechny teoretické poznatky jsou doplněny o detailní rozbor konstrukcí, na kterých jsou dané struktury aplikovány. Tato část práce dále obsahuje klasifikaci fasádních panelů lehkých obvodových plášťů a výrobní technologie panelů s jednoduchým či dvojitým zakřivením. Oběho je využito při detailním popisu vybraných realizací organických fasád budov a také při výběru podkladů pro praktickou část práce.

Praktická část je zaměřena na konkrétní konstrukci fasádního panelu. Je zde popsán proces navrhování, geometrie, materiálové řešení a výroba panelu. Součástí je také testování únosnosti panelu a jeho celkového chování. Statické výpočty provedené softwaru byly ověřeny experimentálními zkouškami v laboratoři.

Z výsledků experimentů vyplývá, že čím větší je kontaktní plocha, skrz kterou je působeno na model, tím větší je jeho únosnost. Model byl zatěžován v různých režimech namáhání, přičemž klíčové byly výsledky první zkoušky, kdy byl model zatěžován liniově. Tento model dosáhl experimentálně únosnosti 27 628 N, což bylo v souladu s výsledky softwarových simulací. Porovnání napětí na přední stěně modelu ukázalo shodu mezi experimentálními a simulovanými výsledky, což potvrzuje spolehlivost softwarových výpočtů. Celkové chování modelu při zkoušce ukázalo, že normálová síla N působící na model v jeho podélné ose způsobí u modelu lokální deformace ve formě boulení přední stěny dříve, než u modelu dojde ke globální deformaci vlivem vzpěru.

Kombinace výsledků z laboratoře a ze softwaru spolu s modelovou podobností, na které je založen model panelu, ukazuje, že únosnost fasádního panelu o délce 4 m při liniovém zatížení dosahuje hodnoty nejméně 25 000 N. Tento typ namáhání byl před zahájením zkoušení vyhodnocen jako nejkritičtější, což experimentální výsledky potvrdily. Přesný typ uložení a ukotvení jednotlivých panelů ve fasádním

systemu nebyl předem znám, proto byly uvažovány kritické varianty, které zahrnovaly i působení sil na zakřivenou část konstrukce.

Rozsah experimentu byl limitován omezeným počtem modelů kvůli finanční náročnosti výroby. K posouzení celkového chování panelu jako součásti fasády bylo třeba provést další testování s více modely. S ohledem na fakt, že model vychází z panelu umístěného na reálné stavbě, nebylo takové testování vyhodnoceno jako primární. Další výzkum by mohl zahrnovat posouzení únosnosti panelu v ohybu při simulaci zatížení větrem a porovnání výsledků s hodnotami rovinných panelů.

Bibliografie

1. LAFOSSE, Michael G. *Advanced Origami, An Artist's Guide to Performances in Paper*. Tokyo: Tuttle Publishing, 2005. ISBN 0-8048-3650-7 (hc).
2. *History of Origami*. Origami Resource Center, 2024-04-01. Dostupné také z: <https://origami-resource-center.com/>.
3. YOSHIZAWA, Akira. *Rabbit Akira Yoshizawa*. 2024-04-02. Dostupné také z: <https://origami-art.us/instructions/153-rabbit-yoshizawa#>.
4. HATORI, Koshiro. *K's Origami*. 2024-04-01. Dostupné také z: <https://origami.ousaan.com/library/index.html>.
5. HUGHES, Sukey. *Washi: The World of Japanese Paper*. Tokyo: Kodansha International, 1978. ISBN 0-87011-318-6.
6. WU, Joseph. *Origami: A Brief History of the Ancient Art of Paperfolding*. Joseph Wu Origami inc., 2024-04-02. Dostupné také z: <https://origami.as/Info/history.php/>.
7. RANDLETT, Samuel. *The Art of Origami: Paper Folding, Traditional and Modern*. Dutton: Faber, 1971. ISBN 978-0571063529.
8. SARNITSKIY, Grigory. *Origami Symbols*. Inkscape, 2024-04-02. Dostupné také z: https://en.wikipedia.org/wiki/Yoshizawa%E2%80%93Randlett_system/.
9. HUDSON, Andrew. *Orizuru - The Origami Crane Diagram*. Andrew Hudson Origami, 2024-04-02. Dostupné také z: <https://ahudsonorigami.wordpress.com/2011/11/07/crane/>.
10. NEWTON, Liz. *The Power of Origami*. Plus Magazine under University of Cambridge, 2024-04-02. Dostupné také z: <https://plus.maths.org/content/power-origami>.
11. LANG, Robert J. *Huzita-Justin Axioms*. Robert J. Lang Origami, 2024-04-03. Dostupné také z: <https://langorigami.com/article/huzita-justin-axioms/>.

12. BERTSCHINGER, Thomas H.; SLOTE, Joseph; SPENCER, Olivia Claire; VINITSKY, Samuel. *The Mathematics of Origami*. 2016.
13. BOHÁČOVÁ, Jana. *Origami Jako Didaktické Prostředí v Matematickém Vzdělávání*. 2009.
14. AHMED, Abdor Rahman; GAUNTLETT, Olivia C.; CAMCI-UNAL, Gulden. Origami-Inspired Approaches for Biomedical Applications. *ACS Omega*. 2021.
15. GENT, Edd. *6 Ways the Centuries-old Art of Origami Is Bringing Us the Future*. NBC News, 2024-04-06. Dostupné také z: <https://www.nbcnews.com/mach/science/6-ways-ancient-art-origami-bringing-us-future-ncna898731>.
16. SHAFER, Jeremy. The Mathematics of Flashers. *Origami for the Connoisseur*. 1995.
17. AR EDITORS. *Church at Atlantida, Uruguay, by Eladio Dieste*. The Architectural Review, 2024-04-07. Dostupné také z: <https://www.architectural-review.com/archive/church-at-atlantida-uruguay-by-eladio-dieste>.
18. FACULTAD DE ARQUITECTURA. *Iglesia de Atlántida Cristo Obrero y Nuestra Señora de Lourdes*. Universidad de la República, 2024-04-07. Dostupné také z: <http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/iglesia-atlantida/nggallery/page/1>.
19. CHENG, Nancy; RODRIGUEZ, Abraham; KOGER, Ashley. Folded Sun-Shades: from Origami to Architecture. In: *100th ACSA Annual Meeting Proceedings, Digital Aptitudes*. 2012.
20. LISTER, David. *What Makes Paper Crease?* British Origami, 2024-04-02. Dostupné také z: <https://www.britishorigami.org/cp-lister-list/what-makes-paper-crease/>.
21. MOSELY, Jeannine. Curved Origami. In: *ACM SIGGRAPH 2008 Art Gallery*. 2008.
22. DEMAINE, Erik; DEMAINE, Martin; KOSCHITZ, Duks; TACHI, Tohomiro. A Review on Curved Creases in Art, Design and Mathematics. *Symmetry: Culture and Science*. 2015.
23. LUKASHEVA, Ekaterina. *Kusudama Me*. Kusudama Me, 2024-04-07. Dostupné také z: <https://kusudama.me/#/>.
24. *Geometry in Architecture Explained*. Archisoup, 2024-04-14. Dostupné také z: <https://www.archisoup.com/studio-guide/geometry-in-architecture>.
25. ARCHGEOM. *Golden Section in the Taj Mahal Architecture*. ArchGeom, 2024-04-14. Dostupné také z: <http://archgeom.blogspot.com/2010/03/golden-section-in-taj-mahal.html>.

26. GAWELL, Ewelina. Non-euclidean Geometry in the Modeling of Contemporary Architectural Forms. *The Journal of Polish Society for Geometry and Engineering Graphics*. 2013, roč. 24, s. 35–43.
27. FOSTER+PARTNERS. *30 St Mary Axe*. Foster+Partners, 2024-04-17. Dostupné také z: <https://www.fosterandpartners.com/projects/30-st-mary-axe>.
28. ZBASNIK-SENEGACNIK, Martina; KUZMAN, Manja. Interpretations of Organic Architecture. *Prostor*. 2014, roč. 22, s. 290–301.
29. NOVOTNÝ, Otakar. Tvoření Formy v Architektuře. *Časopis Styl*. 1911, roč. 4, s. 3–7.
30. MANDELBROT, Benoît B. *Fraktály: Tvar, Náhoda a Dimenze*. Mladá fronta, 2003.
31. LEXOVÁ, Michaela. *Nejkrásnější zelenina na světě zaujala i vědce. Proč? Dům a Zahrada*, 2024-04-18. Dostupné také z: <https://www.dumazahrada.cz/clanek/nejkrasnejsi-zelenina-na-svete-romanesco-20230806.html>.
32. MD RIAN, Iasef; SASSONE, Mario. Tree-inspired dendriforms and fractal-like branching structures in architecture: A brief historical overview. *Frontiers of Architectural Research*. 2014, roč. 3, č. 3, s. 298–323. ISSN 2095-2635. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2014.03.006>.
33. SAISUNDAR.S. *Simple Fractals*. 2024-04-18. Dostupné také z: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Simple_Fractals.png.
34. DE LUSENET, Martin. *Estação do Oriente, Lisboa, Portugal*. 2024-04-18. Dostupné také z: <https://www.flickr.com/photos/martindelusetnet/19198862262/>.
35. KRÁLOVÁ, Magda. *Teselace*. Techmania Science Center, 2024-04-19. Dostupné také z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/matematika/geometrie/teselace>.
36. *The Great Court*. The British Museum, 2024-04-19. Dostupné také z: <https://www.britishmuseum.org/about-us/british-museum-story/architecture/great-court>.
37. FOSTER+PARTNERS. *Great Court at the British Museum*. Foster+Partners, 2024-04-19. Dostupné také z: <https://www.fosterandpartners.com/projects/great-court-at-the-british-museum>.
38. POTTMANN, Helmut; ASPERL, Andreas; HOFER, Michael; KILIAN, Axel. *Architectural Geometry*. 1. vyd. Exton, PA: Bentley Institute Press, 2007. ISBN 978-0-934493-04-5.

39. DUDAMEL, Gustavo. *Walt Disney Concert Hall in Numbers*. LA Phil, 2024-04-29. Dostupné také z: <https://www.laphil.com/about/watch-and-listen/walt-disney-concert-hall-in-numbers>.
40. NELSON, Andrew. *Frank Gehry's Walt Disney Concert Hall*. 2024-04-22. Dostupné také z: <https://veryrealandrew.com/site-visits/2019/11/6>.
41. NÁRODNÍ PAMÁTKOVÝ ÚSTAV. *Smuteční síň*. Památkový Katalog, 2024-04-29. Dostupné také z: <https://pamatkovykatalog.cz/smutecni-sin-20610652>.
42. *Auditorio de Tenerife*. PERI, spol. s r. o., 2024-04-30. Dostupné také z: <https://www.peri.cz/projekty/kulturni-stavby/auditorio-de-tenerife.html>.
43. KRECH, Till. *Auditorio de Tenerife*. 2024-04-22. Dostupné také z: <https://www.flickr.com/photos/extranoise/371267072/>.
44. PLANT, G.; OAKERVEE, D. E. Hong Kong International Airport - civil engineering design. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*. 1998, roč. 126, s. 15–34.
45. *Glass Roof for Shopping Giant by Seele: Chadstone Shopping Centre*. Seele, 2024-05-06. Dostupné také z: <https://seele.com/references/chadstone-shopping-centre>.
46. *Heydar Aliyev Center*. Heydar Aliyev Center, 2024-05-06. Dostupné také z: <https://heydaraliyevcenter.az/>.
47. *Heydar Aliyev Center in Baku*. TESTour, 2024-05-06. Dostupné také z: <https://testour.az/blog/heydar-aliyev-center>.
48. GRADIŠAR, Luka; KLINC, Robert; TURK, Žiga; DOLENC, Matevž. Generative Design Methodology and Framework Exploiting Designer-Algorithm Synergies. *Buildings*. 2022, roč. 12, č. 12. ISSN 2075-5309. Dostupné také z: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/12/2194>.
49. SMORZHENKOV, Nikita; IGNATOVA, Elena. The use of generative design for the architectural solutions synthesis in the typical construction of residential buildings. *E3S Web of Conferences*. 2021, roč. 281, s. 04008. Dostupné z DOI: 10.1051/e3sconf/202128104008.
50. EIGENSATZ, Michael et al. Paneling Architectural Freeform Surfaces. *ACM TOG (Siggraph)*. 2010, roč. 29. Dostupné z DOI: 10.1145/1833349.1778782.
51. ČSN EN 13119 (747200) *Lehké obvodové pláště - Terminologie*. Praha, 2018. Tech. zpr. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

52. VEJVARA, Luděk. *Výškové a halové stavby*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2020. Výukový materiál - skripta.
53. ČSN 747250 *Lehké obvodové pláště - Požadavky na zabudování*. Praha, 2018. Tech. zpr. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
54. LOONEN, Roel et al. Design for façade adaptability – Towards a unified and systematic characterization. In: 2015.
55. LUTHANDER, Rasmus; WIDÉN, Joakim; NILSSON, Daniel; PALM, Jenny. Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. *Applied Energy*. 2015, roč. 142, s. 80–94. ISSN 0306-2619.
56. ATTIA, Shady; LIOURE, Romain; DECLAUDE, Quentin. Future trends and main concepts of adaptive facade systems. *Energy Science and Engineering*. 2020, roč. 1, s. 1–18.
57. TUPE, Hairati. *Animated systems // Al Bahar Towers*. Institute for advanced architecture of Catalonia, 2024-05-15. Dostupné také z: <https://www.iaacblog.com/programs/animated-systems-al-bahar-towers/>.
58. *Ohýbané sklo - Flexibilita návrhu bez kompromisů v energetické náročnosti*. Guardian Glass, 2024-05-15. Dostupné také z: <https://www.guardianglass.com/eu/cs/why-glass/build-with-glass/applications-of-glass/glass-for-facades/curved-facades#how>.
59. SCHIELKE, Thomas. *Mind-Benders: 5 Unbelievable Curved Glass Façades*. Architizer, 2024-05-15. Dostupné také z: <https://architizer.com/blog/inspiration/collections/curved-glass-facades/>.
60. *The adaptive mould*. Curve works, 2024-05-15. Dostupné také z: <https://curveworks.nl/processing-equipment/>.
61. LENFELD, Petr. *Tváření kovů*. Technická univerzita Liberec, Fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie, Oddělení tváření kovů a plastů, 2024-05-18. Dostupné také z: https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/obsah_kovy.htm.
62. ŘIHÁČEK, Jan; PODANÝ, Kamil; PETERKOVÁ, Eva. *Kapalina jako tvářecí medium*. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2024-05-18. Dostupné také z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kapalina-jako-tvareci-medium>.
63. BERRUBÉ, Alban; HIDALGO, Jorge; AUBRY, Simon; LEDUC, Nicolas. *Forming process of façade panels by curved folding with combined geometric and mechanical optimisation*. 2019.

64. CHEBAN, Oleksandr. *How to build a Zaha Hadid facade: from concept sketches to system fabrication*. LinkedIn, 2024-05-11. Dostupné také z: <https://www.linkedin.com/pulse/how-build-zaha-hadid-facade-from-concept-sketches-pascual-castej%C3%B3n>.
65. CASTEJÓN, Angel Pascual. *How to build a Zaha Hadid facade: from concept sketches to system fabrication*. LinkedIn, 2024-05-11. Dostupné také z: <https://www.linkedin.com/pulse/how-build-zaha-hadid-facade-from-concept-sketches-pascual-castej%C3%B3n>.
66. FURTADO, Rui; PEREIRA, Miguel. *Proceedings of the International fib Symposium on Conceptual Design of Structures*. MAAT - Museum of Art, Architecture and Technology, Lisbon. Attisholz: fib - Fédération Internationale du Béton, 2021. Č. 55. ISBN 978-2-940643-12-7.
67. LEVETE, Amanda; ARROCET, Maximiliano; BARBERAN, Fernando Ruiz; BILOS, Mirta; BULYGIN, Alex. *MAAT Lisbon, Portugal*. ALA, 2024-05-13. Dostupné také z: <https://www.ala.uk.com/selected-projects/maat/>.
68. GHINITOIU, Laurian. *Opus*. Zaha Hadid Architects, 2024-05-14. Dostupné také z: <https://www.zaha-hadid.com/architecture/opus/>.
69. *Opus*. Zaha Hadid Architects, 2024-05-14. Dostupné také z: <https://www.zaha-hadid.com/architecture/opus/>.
70. IVANOV, Ilya. *Ferrum 1*. Tchoban Voss, 2024-05-18. Dostupné také z: <https://tchobanvoss.de/project/show/DE/a707b025-8370-94cf-2aa0-ffff16765b9b>.

Seznam použitých zkratek a znaků

F Síla. 58–60

N Newton. 56, 58–61, 63

m Metr. 18, 28, 47, 63

*m*² Metr čtvereční. 32, 48

min Minuta. 56, 58–60

mm Milimetr. 28, 45, 50–52, 54, 56–60

w Deformace. 58–60

2D Dvoudimenzionální. 11

3D Trojdimenzionální. 11, 42, 44, 45, 48

CAD Počítačem podporované projektování, z angl. computer-aided design. 17, 30, 36, 44

CHS Kruhový uzavřený válcovaný profil. 45

CNC Číslicové řízení, z angl. computer numerical control, často užito ve spojení CNC stroj - počítačem řízený stroj. 43

DC Dvojitě zakřivené, z angl. double curved. 33, 43, 48

FP Fasádní panel. 57

GD Generativní design. 36

GFRC Beton vyztužený skleněnými vlákny. 44

GFRP Polymer vyztužený skleněnými vlákny. 42, 44

LED Elektroluminiscenční dioda. 48

LOP Lehký obvodový plášť. 35, 76

PQ Rovinný čtyřúhelník, z angl. planar quad. 32–35, 76

PVB Polyvinylbutyral. 48

SC Jednoduše zakřivené, z angl. single curved. 33, 41, 43

SHS Čtvercový uzavřený válcovaný profil (jeklový profil). 47

UV Ultrafialový. 42

ČSN Česká technická norma. 38

Seznam obrázků

2.1	Příklad návodu ke složení origami [3]	6
2.2	Nákres origami <i>mecho</i> a <i>ocho</i> [Autorka]	7
2.3	Symbol přehybu <i>valley</i> [8]	8
2.4	Symbol přehybu <i>mountain</i> [8]	8
2.5	Symbol zpětného přehybu <i>valley</i> [8]	8
2.6	Symbol <i>rotace</i> [8]	9
2.7	Symbol <i>otevření</i> [8]	9
2.8	Symbol <i>spojení bodů</i> [8]	9
2.9	Origami diagram <i>orizuru</i> [9]	10
2.10	Rozložení stenu po zavedení do cévy [14]	12
2.11	Design stínidla [15]	12
2.12	Origami <i>flasher</i> [16]	13
2.13	Kostel <i>Iglesia de Estación Atlántida</i> [18]	13
2.14	Půdorys kostela <i>Iglesia de Estación Atlántida</i> [18]	14
2.15	Výstavba kostela <i>Iglesia de Estación Atlántida</i> [17]	15
2.16	Stínící clona v pohledu z interiéru, zleva: léto, podzim, zima [19]	15
2.17	Curved-crease origami [23]	16
2.18	Pohled na průčelí Tádž Mahalu znázorňující proporce stavby [25]	18
2.19	30 St Mary Axe Tower, architekt. pohled (vlevo) a fotografie (vpravo) [27]	19
2.20	Organické prvky v konstrukci budovy muzea POLIN [Autorka]	20
2.21	<i>Brassica oleracea</i> [31]	21
2.22	Fraktálový strom [33]	22
2.23	Budova nádraží Garo do Oriente v Lisabonu [34]	22
2.24	Velká dvorana Britského muzea [37]	23
2.25	Typy rozvinutelných ploch [38]	23
2.26	Rozvinutí válcové plochy do roviny [38]	25
2.27	Rozvinutí diskretizace kuželové plochy do roviny [38]	25
2.28	Diskretizace plochy tečen prostorové křivky [38]	26
2.29	Koncertní hala Walta Disneyho [40]	27
2.30	Smuteční síň hřbitova Kamenice nad Lipou [Autorka]	28

2.31	Emauzské opatství [Autorka]	29
2.32	Auditorio de Tenerife [43]	30
2.33	Diskrétní síť, zleva trojúhelníková a čtyřúhelníková [38]	31
2.34	Spoj ve vrcholu trojúhelníkové sítě o valenci šest [44]	32
2.35	PQ-sít' zastřešení obchodního centra Chadstone [45]	33
2.36	Polodiskrétní síť fasády Heydar Alijevova centra [47]	33
2.37	Geometrická nosná konstrukce sítí M a M^* [38]	34
2.38	Paralelní síť spojené geometrickou nosnou konstrukcí v praxi - dvojitý LOP [38]	35
2.39	Iterační fáze diskretizace fasády budovy [50]	37
2.40	Dynamické fasádní panely rozevírající se v závislosti na intenzitě slunečního záření [57]	41
2.41	Užití konkávního tvaru ohýbaného skla [59]	42
2.42	Adaptivní forma na tvarování kompozitních panelů [60]	43
2.43	Heydar Aliyev centrum v Baku [47]	44
2.44	Pokládka panelů na budovu [64]	45
2.45	Galerie muzea MAAT [Autorka]	46
2.46	Fasáda galerie muzea MAAT [Autorka]	46
2.47	Nosná konstrukce spolu s příhradami a vaznicemi (vlevo), nastavitelné hliníkové profily spolu s dlaždicemi (vpravo) [66]	47
2.48	Budova hotelu [68]	48
2.49	Zakřivené panely organické části budovy [68]	48
3.1	Budova Ferrum Business Center [70]	50
3.2	Architektonický pohled severní [70]	50
3.3	Postavení panelů [70]	51
3.4	Geometrie modelu [Autorka]	51
3.5	Rozvinutý tvar dílců [Autorka]	52
3.6	Model fasádního panelu - pohled zezadu, zepředu a z boku [Autorka]	53
3.7	Náhled na konstrukci v prostoru ve Fin 3D (vlevo) a ve FEAT 1998 (uprostřed a vpravo) [Autorka]	54
3.8	Průběh zkoušky [Autorka]	55
3.9	Orientace a uchycení modelu ve stroji [Autorka]	57
3.10	Zkouška FP.1.1 - graf závislosti působící síly na deformaci modelu [Autorka]	58
3.11	Zkouška FP.1.1 - počáteční a koncový stav [Autorka]	58
3.12	Zkouška FP.2.1 - graf závislosti působící síly na deformaci modelu [Autorka]	59
3.13	Zkouška FP.2.1 - počáteční a koncový stav [Autorka]	60

3.14	Zkouška FP.2.2 - graf závislosti působící síly na deformaci modelu [Autorka]	61
3.15	Zkouška FP.2.2 - počáteční a koncový stav [Autorka]	61
3.16	Rozložení napětí v horní části konstrukce ve FEAT 1998 [Autorka]	62
3.17	Hranice boulení přední stěny modelu po zkoušce FP.2.2 [Autorka]	62

Seznam tabulek

3.1	Údaje o zkoušce FP.1.1 [Autorka]	58
3.2	Údaje o zkoušce FP.2.1 [Autorka]	59
3.3	Údaje o zkoušce FP.2.2 [Autorka]	60

Přílohová část

5